

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи



Ардашев Дмитрий Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ
В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Специальности:

05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
В.И. Гузеев

Челябинск – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Список основных сокращений и условный обозначений	6
Введение	13
Глава 1. Особенности проектирования операций абразивной обработки в условиях многономенклатурного производства	
1.1. Прогнозирование результатов выполнения технологических процессов.	26
1.2. Современные проблемы проектирования операций шлифования.	32
1.3. Оценка работоспособности абразивных инструментов отдельными показателями.	46
1.4. Комплексное описание работоспособности абразивных инструментов. . .	56
1.4.1. Способы измерения эксплуатационных показателей.	57
1.4.2. Системы автоматизированного тиражирования сведений о работоспособности абразивных инструментов.	61
1.5. Существующие методики учета различных технологических условий при проектировании операций механической обработки.	79
1.6. Износ абразивных инструментов в процессах шлифования.	88
1.6.1. Кинетическая трактовка механического износа абразивного зерна. .	97
1.6.2. Физико-химический износ абразивного зерна в процессах шлифования.	101
1.7. Выводы. Рабочая гипотеза, цель и задачи работы.	111
Глава 2. Разработка методики континуального проектирования операций шлифования	
2.1. Формирование понятия «континуальное проектирование».	115
2.2. Целевая функция.	122
2.3. Описание работоспособности шлифовального круга	
2.3.1. Формирование набора показателей работоспособности шлифовальных кругов.	125
2.3.2. Формализация показателей работоспособности.	127
2.3.3. Комплекс эксплуатационных показателей с учетом временной нестационарности процесса.	129
2.4. Система технологических ограничений.	133
2.5. Выводы.	134

Глава 3. Прогнозирование величины износа абразивного зерна в процессах шлифования	
3.1. Основное уравнение для определения величины износа абразивного зерна при шлифовании.	135
3.2. Модель термофлуктуационного разрушения абразивного зерна	
3.2.1. Определение параметров, входящих в расчетное уравнение.	136
3.2.2. Имитационное моделирование напряженного состояния абразивного зерна в процессах шлифования.	139
3.2.3. Долговечность абразивного зерна в различных технологических условиях.	144
3.2.4. Прогнозирование массы абразивного зерна, изношенной в результате его механического износа.	147
3.3. Физико-химический износ абразивного зерна	
3.3.1. Общий вид формулы для определения величины износа.	152
3.3.2. Методика определения коэффициента предельной растворимости. . .	153
3.3.3. Методика определения коэффициента сродства абразивного и обрабатываемого материала.	154
3.3.4. Исследование влияния химсостава обрабатываемого материала на интенсивность физико-химического износа абразивного зерна. . .	162
3.3.5. Прогнозирование массы абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического износа.	168
3.4. Обобщенная математическая модель износа абразивного зерна	
3.4.1. Основное уравнение.	171
3.4.2. Сравнительный анализ различных механизмов износа.	172
3.5. Математическая рекурсивная модель размера площадки затупления абразивного зерна.	174
3.6. Алгоритм расчета размера площадки затупления абразивного зерна. . .	177
3.7. Адекватность разработанной модели размера площадки затупления. . .	181
3.8. Выводы.	183
Глава 4. Прогнозирование работоспособности шлифовальных кругов	
4.1. Постановка задачи создания системы прогнозных моделей.	184

4.2. Прогнозирование радиальной составляющей силы шлифования	
4.2.1. Прогнозная модель.	184
4.2.2. Экспериментальная проверка прогнозной модели.	185
4.3. Прогнозирование шероховатости шлифованной поверхности	
4.3.1. Прогнозная модель.	188
4.3.2. Экспериментальная проверка прогнозной модели.	190
4.4. Прогнозирование температуры шлифования	
4.4.1. Прогнозная модель.	194
4.4.2. Экспериментальная проверка прогнозной модели.	195
4.5. Выводы.	196
Глава 5. Создание комплекса инженерных методик континуального проектирования операций шлифования	
5.1. Методика определения режимно-временной области эксплуатации шлифовального круга.	197
5.2. Методика определения периода стойкости шлифовального круга.	201
5.3. Общий алгоритм методики континуального проектирования операций шлифования.	206
5.4. Методика проектирования операции шлифования кругом конкретной характеристики (сценарий I)	207
5.5. Методика выбора пары «характеристика ШК – режим шлифования» (сценарий II)	212
5.6. Модуль технологической подготовки «T&Tool»	217
5.7. Выводы.	218
Глава 6. Практическая реализация методики континуального проектирования операций шлифования	
6.1. Оценка работоспособности шлифовальных кругов.	220
6.2. Повышение эффективности операций абразивной обработки	
6.2.1. Повышение эффективности эксплуатации инструмента конкретной характеристики в различных технологических условиях.	220
6.2.2. Выбор пары «характеристика ШК – режим шлифования».	222
6.2.3. Формирование порядка замены инструмента на станке при известной перспективной ситуации.	228
6.3. Выводы.	232

Глава 7. Внедрение результатов работы

7.1. Справочник «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах»	
7.1.1. Выбор характеристики шлифовального круга.	233
7.1.2. Средние величины периодов стойкости шлифовальных кругов различных характеристик, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях.	236
7.2. Нормативно-техническая документация.	236
7.3. Результаты.	239
Заключение.	240
Список литературы.	247
Приложение А. Аппаратное, методическое обеспечение и результаты экспериментальных исследований коэффициентов сродства абразивного и обрабатываемого материалов.	279
Приложение Б. Аппаратное и методическое обеспечение экспериментальных исследований эксплуатационных показателей шлифовальных кругов.	296
Приложение В. Аппаратное и методическое обеспечение экспериментальных исследований процесса шлифования методом микрорезания.	307
Приложение Г. Внедрение результатов работы.	311

Список основных сокращений и условных обозначений

ГрОМ – группа обрабатываемого материала;

ОМН – общемашиностроительные нормативы;

СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость;

СОТС – смазочно-охлаждающее технологическое средство;

ТПП – технологическая подготовка производства;

ШК – шлифовальный круг;

П – припуск, удаляемый на операции, мм;

A – параметр, характеризующий напряжения резания;

a – толщина срезаемого слоя, мм

a_t – коэффициент температуропроводности;

$A_{ш}$ – относительная опорная площадь шлифовального круга, мм²;

b – ширина срезаемого слоя, мм;

b_j – ширина режущей кромки единичного абразивного зерна, мм;

b_p – коэффициент формы зерна;

V_k – высота шлифовального круга, мм;

$b_{ш}$ – ширина шлифования, мм;

C_0 – предельная растворимость раствора в растворителе;

C_{Ra} , C_{zy} , C_N , μ , λ , δ , n , p , q , r , w , x , y , q , z , K' , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , p_0 , α , β – эмпирические коэффициенты, зависящие от условий выполнения операции шлифования (в эмпирических моделях расчета различных показателей шлифования);

C_s – параметр, характеризующий плотность распределения абразивных зерен на поверхности шлифовального круга;

C_w – эмпирический коэффициент, влияющий на величину износа шлифовального круга;

D – коэффициент диффузии, см²/с;

D_0 – коэффициент диффузии при температуре, равной бесконечности, см²/с;

D_k – диаметр шлифовального круга, мм;

D_{cp} – коэффициент сродства, см²/с;

d_e – эквивалентный диаметр, мм;

d_z – средний размер зерен в круге;

d_3 – диаметр шлифуемой заготовки, мм;

E_1, E_2 – коэффициент Пуассона связки инструмента и обрабатываемого материала соответственно;

f – количество замен шлифовальных кругов;

F_2 – действительная площадь контакта шлифовального круга с деталью, являющаяся функцией твердости, зернистости и износостойкости зерен разных абразивных материалов, мм²;

G – плотность раствора, г/см³;

H – высота остаточной поперечной шероховатости, мкм;

HV – твердость обрабатываемой поверхности;

$h_{изн}$ – высота износившейся части абразивного зерна, мм;

$H_{СК}^H, H_{СК}^3$ – параметр микрогеометрии поверхностного слоя после обработки не-закаленной и закаленной стали соответственно, мкм;

h_x, h_y – размеры теплового источника, мм;

i – число рабочих ходов круга, шт.;

I_0 – функция Бесселя от мнимого аргумента (модифицированная функция Бесселя);

J – механический эквивалент теплоты, кг·м;

$\dot{J}_{диф}$ – величина диффузионного потока;

$J_{спид}$ – коэффициент жесткости технологической системы, Н/мм;

k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$), Дж·К⁻¹;

K_1, K_2 – коэффициенты, учитывающие геометрию режущей части зерна;

k_1, k_2 и k_3 – коэффициенты, учитывающие зернистость круга, состав охлаждающей жидкости и влияние зачистных ходов соответственно;

k_a – показатель степени, учитывающий условные напряжения среза;

$K_{спад}$ – поправочный коэффициент на радиальную подачу, зависящий от параметров операции;

K_{vSoc} – поправочный коэффициент на скорость осевой подачи, зависящий от параметров операции;

$K_{v\text{спад}}$ – поправочный коэффициент на скорость радиальной подачи, зависящий от параметров операции;

k_T – коэффициент неоднородности температурного поля;

k_y, k_z – коэффициенты, учитывающие условия шлифования;

l – средний шаг между абразивными зернами инструмента, мм;

L_k – длина дуги контакта, мм;

l_x, l_y – координаты теплового источника в зоне пятна контакта, мм;

$l_{z.i}$ – текущая величина площадки затупления, мм;

$l_{z.i-1}$ – исходная величина площадки затупления, мм (перед очередным контактом зерна с обрабатываемым материалом);

$l_{p.z}$ – среднее расстояние между режущими зернами инструмента, мм;

l_ϕ – фактическое среднее расстояние между шлифующими зернами, мм;

l_ψ – длина абразивной царапины, мм;

l_μ – длина шлифуемой детали, мм;

M – зернистость круга;

m – молярная масса раствора, г/моль;

$M_{a.z}$ – масса изношенной части абразивного зерна в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом, г;

$M_{a.z}^M$ – масса изношенной части абразивного зерна в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом, г;

$M_{a.z}^{\phi-x}$ – масса изношенной части абразивного зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом, г;

M_m – молярная масса растворителя, г/моль;

n – количество обрабатываемых деталей в партии, шт;

N – сила нормального давления на абразивное зерно в процессе шлифования, Н;

N – число выхаживаний, шт;

n^* – количество деталей, обрабатываемых между правками, шт;

N_a – число Авогадро ($6,022 \cdot 10^{23}$), моль⁻¹;

n_z – частота вращения заготовки, мин⁻¹;

n_k – частота вращения шлифовального круга, мин⁻¹;

$N_{рез}$ – мощность резания, кВт;

$N_{ц}$ – количество циклов нагружения абразивного зерна в единицу времени, шт;

$N_э$ – эффективная мощность шлифования, кВт;

P – сила, действующая на абразивное зерно в процессе шлифования, Н;

p_m – количество правок шлифовального круга при обработке m партий, в каждой из которых n деталей, шт;

P_z – тангенциальная составляющая силы шлифования, Н;

P_y – радиальная составляющая силы шлифования, Н;

q – коэффициент перенапряжения межатомных связей;

Q – энергия активации, отнесенная на 1 моль вещества, кДж;

q_i – интенсивность единичного теплового источника, Вт/м²;

q_n – количество одновременно обрабатываемых деталей, шт;

Q_a – скорость изнашивания шлифовального круга, мм/мин;

Q_m – режущая способность, мм/мин;

R – газовая постоянная (8,31), Дж/моль·К;

r – радиус округления абразивных зерен, мм;

R – среднее расстояние, пройденное частицей за время блуждания t_i , мм;

R_a – шероховатость шлифованной поверхности – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;

$R_{a_{нач}}$ – среднеарифметическое отклонение профиля микронеровностей в начальный период работы круга, зависящее от режимов правки инструмента и характеристик обрабатываемого материала, мкм;

$R_{a_{ст}}$ – среднеарифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности по истечении периода приработки круга, определяемое режимами шлифования, характеристиками технологической системы, круга и обрабатываемого материала, мкм;

R_z – шероховатость шлифованной поверхности – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм;

s – площадь, через которую проходит поток, мм²;

S – подача шлифовального круга, мм/об;

- S_{oc} – осевая подача шлифовального круга, мм/ход;
 $S_{рад}$ – радиальная подача шлифовального круга, мм/ход;
 T – время работы шлифовального круга (период стойкости), время работы зерна (время контакта), мин;
 t – глубина резания, мм, текущее время работы зерна, с;
 $T_{нв}^*$ – неполная техническая норма времени, мин;
 $T_{оп}^*$ – неполное оперативное время, мин;
 T' – временной интервал расчета, с;
 t_0 – время контакта режущей кромки единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом, с;
 t_i – время блуждания частицы, с;
 T_t – абсолютная температура нагружаемого тела, К;
 T_z – время работы шлифовального круга (период стойкости), в течение которого обеспечивается выполнение требования z , мин;
 T_d – время диффузии, с;
 T_3 – время на замену шлифовального круга, мин;
 t_n – начальное время действия теплового источника, мин;
 T_o – основное технологическое время, мин;
 $T_{пр.}$ – время на правку шлифовального круга, мин;
 t_f – фактическая глубина резания, мм;
 U – энергия активации процесса разрушения, кДж;
 $U(x)$ – температура в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой, град;
 U, V – коэффициенты, зависящие от марки обрабатываемого материала;
 U_c – температура самоподогрева, °С;
 U_0 – значение $U(\sigma)$ при $\sigma=0$, кДж;
 v_{soc} – скорость осевой подачи шлифовального круга (правящего инструмента), м/мин;
 $v_{спад}$ – скорость радиальной подачи шлифовального круга, мм/мин;
 v_3 – скорость вращения заготовки (движения стола), м/мин;
 V_k – скорость вращения шлифовального круга, м/с;

$W_{\text{а.з.}}$ – объем части абразивного зерна, изношенной в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом, мм^3 ;

$W_{\text{а.з.}}^{\text{М}}$ – объем части абразивного зерна, изношенной в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом, мм^3 ;

$w_{\text{а.з.}}^{\text{М}}$ – элементарный объем абразивного материала, отделяющийся от зерна в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом по истечении периода времени τ , мм^3 .

$W_{\text{а.з.}}^{\text{Ф-Х}}$ – объем части абразивного зерна, изношенной в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом, мм^3 ;

$W_{\text{з}}$ – относительное объемное содержание зерен в круге;

$W_{\text{с}}$ – относительное объемное содержание связки в круге;

u – глубина внедрения абразивного зерна в обрабатываемую поверхность, мм ;

$u_{\text{приж}}$ – глубина прижога на обработанной поверхности, мм ;

z – количество одновременно работающих зерен шлифовального круга, шт;

β – угол между результирующей силой шлифования и направлением вектора скорости вращения круга, град;

β_1 – угол сдвига, град;

γ – коэффициент пропорциональности между средним напряжением, создаваемым силой, приложенной непосредственно к твердому телу, и напряжением, возникающим в единичной межатомной связи;

Δ_0 – относительная погрешность величины, %;

Δx – расстояние между диффундирующими веществами, мм ;

Δc – разность концентраций диффундирующих веществ;

χ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

ξ – коэффициент, учитывающий концентрацию абразивных зерен в инструменте;

η – степень затупления шлифовального круга;

Ψ_0 – функция, определяющая влияние кинематики схемы шлифования на силу шлифования;

ε_i – интенсивность скорости деформации материала при шлифовании, Па ;

$\mu_{\text{т}}$ – коэффициент снижения температуры;

λ_t – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

λ_z – коэффициент, учитывающий свойства и округленность абразивных зерен;

μ – коэффициент трения абразивного материала по обрабатываемому;

μ_1, μ_2 – коэффициент Пуассона связки инструмента и обрабатываемого материала соответственно;

ν_o, μ_o – коэффициенты опорных кривых поверхностей круга;

ρ_z – радиус округления абразивного зерна, мм;

ρ_a – плотность абразивного материала, г/см³;

ρ_m – плотность обрабатываемого материала, г/см³;

σ – напряжения, действующие в абразивном зерне (твердом теле), Па;

σ_0 – амплитуда действующего в теле напряжения, Па;

σ_i – интенсивность сопротивления материала деформации при шлифовании, Па;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, Па;

τ – долговечность тела, с;

τ_0, β_0 – параметры, характеризующие свойства материала поверхностных слоев;

τ_o – касательные напряжения, возникающие в материале при шлифовании Па;

$\tau_{ц}$ – долговечность тела при циклической нагрузке, с;

ω – частота возникновения циклов нагружения, с⁻¹.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировом машиностроении одним из основных критериев успешности любого производства является уровень его гибкости – возможности быстро перестроиться на производство деталей, отличающихся от выпускаемых в текущий момент времени. При этом детали изготавливаются из разных материалов и имеют различные требования к качеству обработки. Это вызвано потребительскими запросами, главными параметрами которых являются моральная и материальная новизна, уникальность изделия.

Характеристики массового производства, такие как большие объемы партий, постоянство номенклатуры изделий, длительный временной интервал их изготовления в настоящее время практически не встречаются. Повсеместной является практически индивидуальная работа с потребителем, которая характеризуется частой сменой номенклатуры выпускаемых изделий. Такая картина наблюдается в любой сфере деятельности стран, являющихся лидерами в области науки, техники и технологии. Достаточно показательным является постоянное обновление производимого модельного ряда у мировых лидеров автомобиле-, станко- и тракторостроения (таблица 1). Более того, подавляющее большинство машиностроительных предприятий вот уже несколько лет достаточно активно использует принцип «платформы», когда базовыми комплектующими являются детали уже выпускаемого продукта, при этом до 40 % деталей являются обновленными, что позволяет данный продукт считать новым в существующей линейке. Такой групповой принцип создания машиностроительной продукции позволяет предприятиям не только постоянно обновлять номенклатуру выпускаемых моделей, но и существенно сократить время на их разработку.

Общими организационно-экономическими особенностями таких предприятий является их высокая степень диверсифицированности, «работа с колес» – отсутствие складов готовой продукции, работа «под заказ», а также максимальное использование ресурсов работоспособности как режущих инструментов, так и металлообрабатывающего оборудования.

Таблица 1 – Обновление линеек продуктов мировых машиностроительных концернов за последние 5 лет

Отрасль	Страна	Компания	Модельный ряд	Платформа	Тенденции
Автомобилестроение	Япония	Toyota	Camry, Lexus, Alphard, Lexus (gyb), Hilux, Avensis и др.	–	Компактность, гибриды, фейслифтинг
	США	Chrysler	Jeep, Wrangler, Compass, Patriot, Sebring, Town & Country и др.	Mercedes Benz (Jeep Grand Cherokee)	Кроссоверы, минивэны, повышение мощности, среднеразмерность, фейслифтинг
		Dodge	Magnum, Durango, Charger, Grand Caravan, Journey, Avenger и др.	DEW98 (Ford, Lincoln, Jaguar (UK))	
	Германия	Volkswagen	Passat, Golf, Tiguan, Touareg и др.	Volkswagen	
	Россия	Lada	Kalina, Priora, Granta, Largus и др.	Renault, Nissan	Фейслифтинг, АПП
Тракторостроение	США	John Deer	8130, 8230 и др.	6000, 8020, 8030	Дизели с эл.управлением, трансмиссии с переключением под нагрузкой, бесступенчатые передачи
		Case New Holland	T9.450, T9.505 и др.	T6000, T9	
		AGCO	MT665D, MT685D и др.	Challenger MT600D	
	Россия	Тракторные заводы	ВМТЗ, Промтрактор, ВгТЗ, Агромаш и др.	Sisu Diesel (Финляндия)	
Станкостроение	Япония	Mori Seiki	NMV, NT и др.	CTX, NVL, NHX	Улучшение ПО, увеличение скоростей, подач, повышение жесткости, применение ПКМ, уменьшение металлоемкости
		Kitamura	НХ и др.	AI Nano Contour Control II	
		Nakamira	WTW, Super NTMX и др.	GS, SC, WT	
		Yamazaki Mazak	INTEGREX, VORTEX, SMART, NEXUS и др.		

Описанная выше ситуация характерна не только для автомобиле-, тракторостроения, но и судостроения, а также производства всех видов подъемно-транспортных, дорожных и др. строительных машин и техники, а также всех видов вооружения. Это обстоятельство вызывает необходимость развития гибких машиностроительных производств, которые базируются исключительно на современном станочном оборудовании, поскольку именно с его помощью может быть осуществлен переход к высокоэффективному и высокорентабельному производству, выпускающему конкурентоспособную продукцию.

Таким образом, во всех отраслях мирового машиностроения происходит постоянное непрерывное обновление выпускаемых продуктов, являющееся неизбежным в силу высокой скорости развития науки, техники, а также постоянного увеличения потребностей человечества. При этом большинство крупных машиностроительных предприятий стремятся максимально удовлетворить индивидуальные требования каждого заказчика – осуществляют выпуск единичной продукции, уникальной по своим эксплуатационным характеристикам, без производства запасов готовой продукции. Описанная многономенклатурная конъюнктура современного мирового рынка формирует специфические условия успешного функционирования предприятий: высокая гибкость, способность оперативно, без существенных затрат времени на отладку технологических процессов, реагировать на изменение условий мировой экономики и перестраиваться на выпуск более современной и эффективной продукции.

Для этого в настоящее время существуют научные подходы к созданию нового пласта автоматизированных систем управления производством – САПЛ ТП, осуществляющих оперативное планирование и управление предприятием в тесной взаимосвязи с технологическими САПР [115–117]. Это позволяет обеспечить существенное сокращение затрат на технологическую подготовку производства на основе учета текущей производственной ситуации.

В мировом машиностроении наиболее распространенным методом чистой и отделочной обработки ответственных и высокозакаленных деталей машин является абразивная обработка. Этим обстоятельством объясняется постоянный

рост мировых объемов производства и потребления абразивных инструментов. Так, по данным ежегодных отчетов ООО «Информ-Инструмент-Абразив-Алмаз», а также Интернет-журнала «220 Вольт» с начала 2008-го года в мировой абразивной индустрии идет непрерывный рост производства абразивного инструмента, в том числе отечественного (рисунок 1).

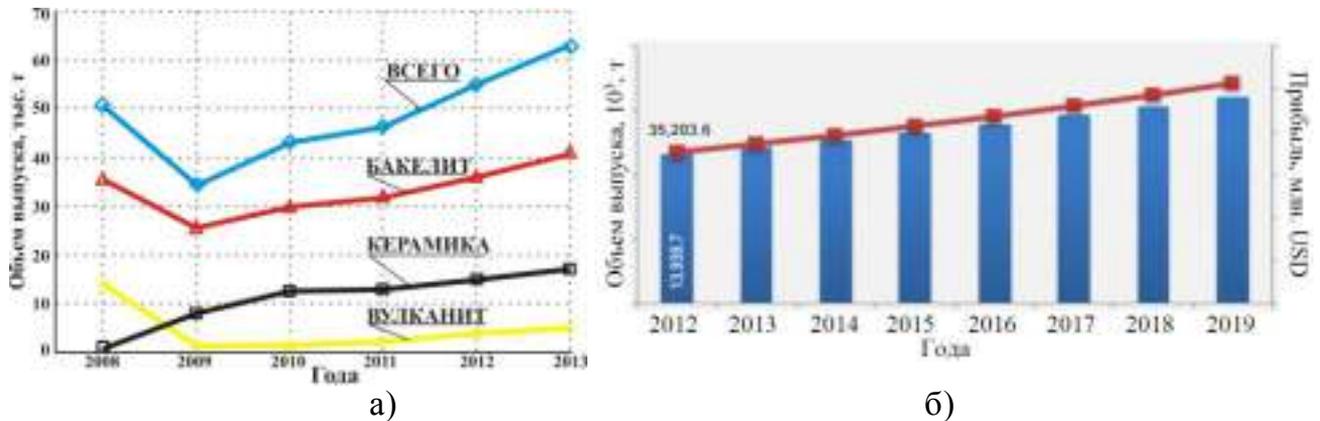


Рисунок 1 – Динамика изменения (а) и прогнозируемый объем производства (б) отечественных абразивных инструментов

В кризисные 2008, 2009 гг. отмечен спад производства бакелитовых и вулканитовых инструментов, что компенсировалось существенным повышением объемов производства керамического инструмента: объемы его производства выросли почти в 10 раз. Описанные факты позволяют заключить, что, несмотря на современные разработки технологии лезвийной обработки, позволяющей также обрабатывать закаленные материалы, абразивный инструмент является наиболее предпочтительным средством чистовой обработки закаленных ответственных деталей машин.

Низкая стоимость изготовления абразивного инструмента, достаточно отработанная и эффективная технология его производства, практически неощутимая доля стоимости израсходованного инструмента в себестоимости детали – все это ставит абразивную обработку на лидирующие позиции в области чистовой механической обработки деталей машиностроения. Разнообразие конструкций шлифовальных станков (рисунок 2), множество схем обработки заготовок различных форм, повсеместность шлифования позволяет данному методу удерживать лидирующие позиции среди чистовых методов обработки. При этом обеспечивается достаточно высокая точность и малая шероховатость обработанной поверхности.

Этим объясняется значительная доля шлифовальных станков, используемых в современной промышленности – порядка 80 %.

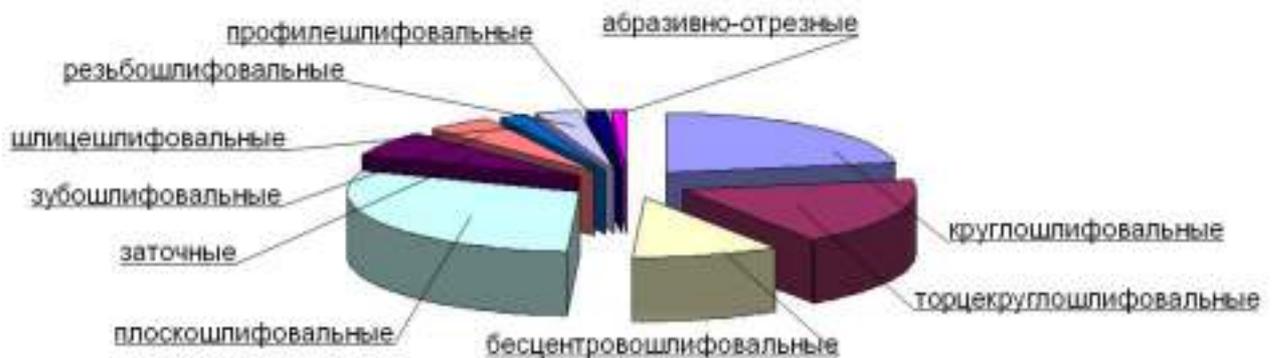


Рисунок 2 – Номенклатура выпускаемых шлифовальных станков

При всех положительных аспектах абразивной обработки в теории проектирования эффективных операций шлифования существует значительный пробел. Он вызван сложившейся ситуацией и заключается, прежде всего, в отсутствии в настоящее время четких и обоснованных рекомендаций по эксплуатации шлифовальных кругов (ШК) различных характеристик в условиях частой и быстрой смены номенклатуры обрабатываемых заготовок, что характерно для современных условий машиностроительного производства, как описано выше.

Причина в том, что в годы СССР тип машиностроительного производства соответствовал массовому. В связи с этим рекомендации по проектированию операций шлифования были построены по следующей схеме: каждую партию заготовок, поступающих на станок, необходимо было обрабатывать ШК конкретной характеристики, зачастую отличающейся от установленной на станке. В то время такая методика себя оправдывала: размеры партии обрабатываемых деталей были велики, изменение номенклатуры изготавливаемых деталей происходило крайне редко, следовательно, суммарный ресурс работоспособности ШК мог быть выработан полностью. Кроме того, известно, что при замене ШК на станке, необходима двойная балансировка – статическая и динамическая, а также длительная правка круга: столь значительных временных затрат требовали нормативные рекомендации [88, 218, 219]. Затраты времени на такую подготовку производства вполне

были оправданы выбором ШК, обладающего наилучшей работоспособностью для производства деталей из определенного материала, с конкретными требованиями по точности, шероховатости, бесприжоговости и т.д.

В условиях многономенклатурного производства, характерного для современного машиностроения, выполнение манипуляций, сопровождающих замену ШК на станке, требует частого вывода единиц оборудования из производственного цикла, высвобождения рабочих, что крайне негативно сказывается на производительности, а следовательно и на экономической эффективности технологических процессов. Более того, частая замена ШК на станке приводит к существенному расходу инструмента, в основном на правку – в наладочный период. При этом доля абразивного инструмента, израсходованного непосредственно на обработку деталей, составляет порядка 3–5 %. Вместе с этим, применение существующих в настоящее время рекомендаций [218, 219] предполагает определенный запас абразивного инструмента на складе, что приводит к дополнительным финансовым затратам.

Описанные обстоятельства вынуждают машиностроительные предприятия использовать ШК для изготовления различных деталей, отличающихся не только требованиями чертежа – точностью, шероховатостью, но и основным материалом. В связи с тем, что имеющиеся рекомендации по проектированию операций шлифования не подходят для использования в сложившихся условиях, выбор характеристики ШК и режимов обработки различных заготовок осуществляется интуитивно, на основе опыта рабочего-шлифовщика или наладчика станка. Распространенной является ситуация, когда производительность «спроектированной» таким образом операции шлифования крайне низка.

Таким образом, в современном многономенклатурном машиностроительном производстве существует актуальная научная проблема, имеющая важное государственное хозяйственное значение. Она заключается в отсутствии в настоящее время методики проектирования операций шлифования для условий современного многономенклатурного производства. Решение этой проблемы возможно на основе создания новой методики проектирования операций шлифования, которая основана

на прогнозировании работоспособности абразивного инструмента и определении условий его эффективной эксплуатации в конкретных технологических условиях.

Степень разработанности темы. Существующие работы, направленные на повышение эффективности операций шлифования, можно разделить на три группы:

- работы, посвященные эмпирическому получению сведений о работоспособности абразивных инструментов в виде отдельных показателей;
- работы, посвященные комплексной оценке работоспособности инструментов по результатам стендовых испытаний;
- работы, позволяющие проектировать эффективные операции шлифования для конкретных технологических условий.

Общим существенным недостатком указанных выше работ является то, что они не позволяют проектировать эффективные операции шлифования для широкого диапазона технологических условий, а ограничены рамками проведенных стендовых испытаний либо условиями применимости разработанных моделей процесса.

Цель работы. Повышение эффективности операций шлифования в многономенклатурном производстве на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка методики континуального проектирования операций шлифования, позволяющей повысить их эффективность за счет учета работоспособности ШК в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

2. Разработка математической модели размера площадки затупления абразивного зерна, связывающей ее величину с параметрами эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования).

3. Создание методики прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, позволяющей за счет учета текущей величины размера площадки затупления единичного абразивного зерна прогнозировать работоспособность инструмента для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования, требования к качеству обработки).

4. Разработка методики определения периода стойкости ШК, позволяющей определять режимно-временную область его рациональной эксплуатации на основе спрогнозированной работоспособности.

5. Разработка комплекса инженерных методик континуального проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, позволяющего повысить их эффективность за счет учета работоспособности инструмента в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования, требования к качеству обработки).

6. Разработка алгоритмического и информационного обеспечения контура технологической подготовки, осуществляющего автоматизированное проектирование операций шлифования на основе разработанной методики континуального проектирования операций шлифования.

7. Выполнение практической реализации, опытно-промышленной апробации и внедрения результатов работы.

Научная новизна работы.

1. Разработана методика континуального проектирования операций шлифования, реализуемая на основе учета работоспособности ШК, впервые позволяющая проектировать эффективные операции шлифования в многономенклатурном производстве для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы), с учетом требований к качеству обработки (по точности, шероховатости, бесприжоговости) с минимальными затратами времени на обработку.

2. Разработана математическая модель долговечности абразивного зерна при шлифовании, реализованная на основе кинетической теории прочности твердых тел, впервые устанавливающая взаимосвязь между технологическими условиями эксплуатации ШК и механическим износом единичного абразивного зерна.

3. Установлено влияние химического состава материала обрабатываемой заготовки на величину физико-химического износа единичного абразивного зерна посредством коэффициента сродства, определяющего интенсивность физико-химического взаимодействия между абразивным и обрабатываемым материалом,

предложены эмпирические модели для его прогнозирования в зависимости от концентрации элементов, входящих в состав материала обрабатываемой заготовки.

4. Разработана математическая модель величины износа абразивного зерна, учитывающая время его работы, технологические условия его эксплуатации (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования), а также основные механизмы его износа при шлифовании – механический и физико-химический.

5. Разработана математическая модель размера площадки затупления абразивного зерна, учитывающая время работы инструмента, позволяющая определять ее величину для широкого диапазона параметров эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования) и прогнозировать величину износа зерна с учетом основных его механизмов – механического и физико-химического.

6. Разработана методика прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, включающая систему имитационных стохастических моделей, учитывающих изменчивость величины площадки затупления единичного абразивного зерна во времени, что позволяет прогнозировать работоспособность ШК в широком диапазоне параметров эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования) с учетом времени работы инструмента.

7. Разработана методика определения периода стойкости ШК, реализуемая на основе определения режимно-временной области рациональной эксплуатации ШК, что позволяет определить величину времени эффективной работы инструмента исходя из его работоспособности и требований к качеству обработки (точность, шероховатость, неприжоговость).

Положения, выносимые на защиту.

1. Понятие «континуальное проектирование», подразумевающее проектирование операций шлифования с учетом работоспособности ШК в широком диапазоне параметров его эксплуатации (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования) и во взаимосвязи со временем его эксплуатации.

2. Методика континуального проектирования операций шлифования, учитывающая работоспособность ШК и позволяющая проектировать эффективные опе-

рации шлифования в многономенклатурном производстве для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

3. Математическая модель величины износа абразивного зерна, учитывающая время его работы, технологические условия эксплуатации инструмента (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования), а также основные механизмы износа абразивного зерна при шлифовании – механический и физико-химический.

4. Математическая модель размера площадки затупления абразивного зерна, позволяющая определить ее величину для широкого диапазона технологических условий эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования), с учетом времени работы инструмента.

5. Математическая модель долговечности абразивного зерна при шлифовании, связывающая технологические условия эксплуатации ШК и механический износ единичного абразивного зерна инструмента.

6. Имитационная твердотельная модель взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью, позволяющая определить величину напряжений, действующих в теле абразивного зерна.

7. Методика определения коэффициента химического сродства абразивного и обрабатываемого материала, позволяющая установить влияние химического состава материала обрабатываемой заготовки и температуры на интенсивность физико-химического взаимодействия между материалами при шлифовании.

8. Эмпирические регрессионные модели коэффициента сродства, позволяющие расчетным способом определить его величину в зависимости от концентрации легирующих элементов, входящих в состав материала обрабатываемой заготовки.

9. Методика прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, реализуемая при помощи системы моделей эксплуатационных показателей ШК за счет учета временной изменчивости величины площадки затупления единичного абразивного зерна.

10. Методика определения периода стойкости ШК, позволяющая определить режимно-временную область рациональной эксплуатации ШК для различных технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования по точности, шероховатости, бесприжогости).

11. Комплекс инженерных методик проектирования эффективных операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, реализованный на основе разработанной методики континуального проектирования.

Практическая значимость работы.

1. Разработан комплекс инженерных методик континуального проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства на основе прогнозирования работоспособности ШК.

2. Разработаны справочные рекомендации по выбору характеристики абразивного инструмента в части назначения марки материала абразивного зерна ШК для различных технологических условий операции шлифования (разные марки обрабатываемого материала).

3. Разработаны справочные рекомендации по определению периода стойкости ШК различных характеристик, эксплуатирующихся в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

4. Разработано алгоритмическое и информационное обеспечение модуля технологической подготовки производства «Т&ТооL», реализующего методику континуального проектирования операций шлифования.

Методология и методы исследования. Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, кинетической теории прочности твердых тел, корректным использованием методов математического и численного моделирования, в частности с применением программного комплекса «Ansys», корректным использованием методов планирования и обработки результатов экспериментов.

Достоверность результатов работы. Достоверность основных положений работы, выводов и рекомендаций подтверждена сравнением данных, полученных расчетным путем по разработанным методикам и моделям, с результатами прямых экспериментов, выполненных с применением аттестованного измерительного оборудования, а также сопоставлением с производственными данными.

Внедрение результатов работы.

1. Результаты работы, оформленные в виде рекомендаций по назначению марки абразивного материала для проектирования операций шлифования, включены в справочник по режимам шлифования (издания 2007 и 2012 гг.). Справочник прошел промышленную апробацию и внедрен в технологических службах 99 предприятий РФ, включая предприятия машиностроения, автомобилестроения, аэрокосмической отрасли, а также принят к использованию в учебном процессе в 16 учреждениях высшего и 8 учреждениях среднего профессионального образования.

2. Результаты работы оформлены в виде РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов», который прошел промышленную апробацию и внедрен на машиностроительных предприятиях РФ, а также на предприятиях, занимающихся производством и реализацией абразивной продукции в качестве методического и нормативно-технологического сопровождения.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях (г. Челябинск – 2004...2017 гг.), международных, всероссийских конференциях и семинарах (г. Волжский – 2003, 2004, 2009 гг., г. Екатеринбург – 2003, 2009 гг., г. Тольятти – 2008, 2009 гг., г. Санкт-Петербург – 2010 г., г. Москва – 2010...2013, 2015...2017 гг., г. Курск – 2013 г., г. Барнаул – 2014 г., г. Брянск – 2015 г., TUB IWF, Braunschweig, Germany – 2011 г.).

Работа выполнялась в рамках:

- задания Рособразования на проведение фундаментальных научных исследований № 7.4079.2011, тема: «Теория механического и физико-химического взаимо-

действия абразивного и обрабатываемого материала в процессах абразивной обработки», 2012–2013 гг.;

- задания Министерства образования и науки РФ № 9.5589.2017/8.9, тема: «Суперкомпьютерный инжиниринг технологических процессов обработки высокоточных изделий машиностроения», 2017 г. – по настоящее время;
- грантов Правительства и Губернатора Челябинской области;
- программы воспроизводства кадрового потенциала ЮУрГУ (НИУ).

Глава 1. Особенности проектирования операций абразивной обработки в условиях многономенклатурного производства

1.1. Прогнозирование результатов выполнения технологических процессов

Современная конъюнктура мирового рынка машиностроения определяет гибкость производства как основополагающее свойство любого предприятия, способного на высоком уровне конкурировать своей продукцией на мировом рынке. Гибкость в свою очередь однозначно зависит от способности оперативно, с незначительными затратами времени и финансовых средств перестраиваться на выпуск новой продукции, отвечающей современным требованиям потребителя. Все это требует в кратчайшие сроки и с высоким качеством осуществлять такие затратные по времени манипуляции, как отработка детали на технологичность, расчетное определение размеров исходных заготовок, подбор оборудования, наиболее эффективного для выполнения проектируемого технологического процесса, выбор или разработка конструкторской документации для оснастки, назначение характеристики инструмента, норм расхода основных и вспомогательных материалов, разработка графика подготовки производства, временное и режимное нормирование технологического процесса и т.п.

В связи с этим, эффективность функционирования производства на современном витке его развития определяется, прежде всего, временными затратами на его подготовку, отладку и запуск. Технологическая подготовка производства занимает от 50 до 80 % от общей трудоемкости подготовки производства. В свою очередь эффективность производства напрямую зависит от качества выполнения его технологической подготовки [322].

С другой стороны, любое производство нацелено на выпуск продукции, отвечающей требованиям НТД. Наиболее важным этапом ТПП, с точки зрения быстрого получения продукта требуемого качества, является этап предварительного моделирования процесса, оценки полученных результатов и выработки корректирующих мероприятий перед запуском производства. Наличие такого этапа позволяет практически при нулевых затратах производить корректировку исходных данных технологического процесса, путем итераций подобрать наилучшие усло-

вия его выполнения, прогнозировать выходной результат для определенных исходных данных и т.д. Подобное моделирование осуществляется с применением высокомоощных компьютерных средств, с использованием специального математического аппарата в САЕ-модулях различного рода САПР (рисунки 1.1.1, 1.1.2).

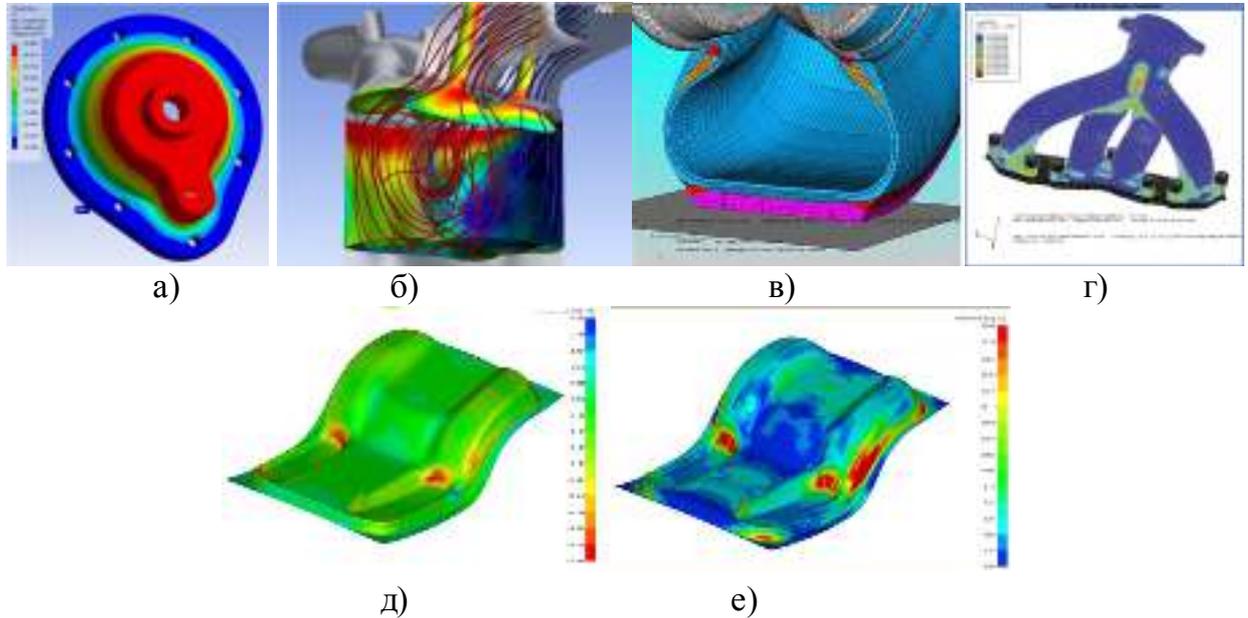


Рисунок 1.1.1 – Результаты прогнозирования в различных пакетах:
 Ansys: а) распределения температуры при штамповке, б) распределения тепловых потоков и течений в цилиндре ДВС; Abacus: в) распределения напряжений при изготовлении трубы; г) распределения напряжений под эксплуатационными нагрузками;
 Forming Suite: д), е) распределения напряжений при прессовании

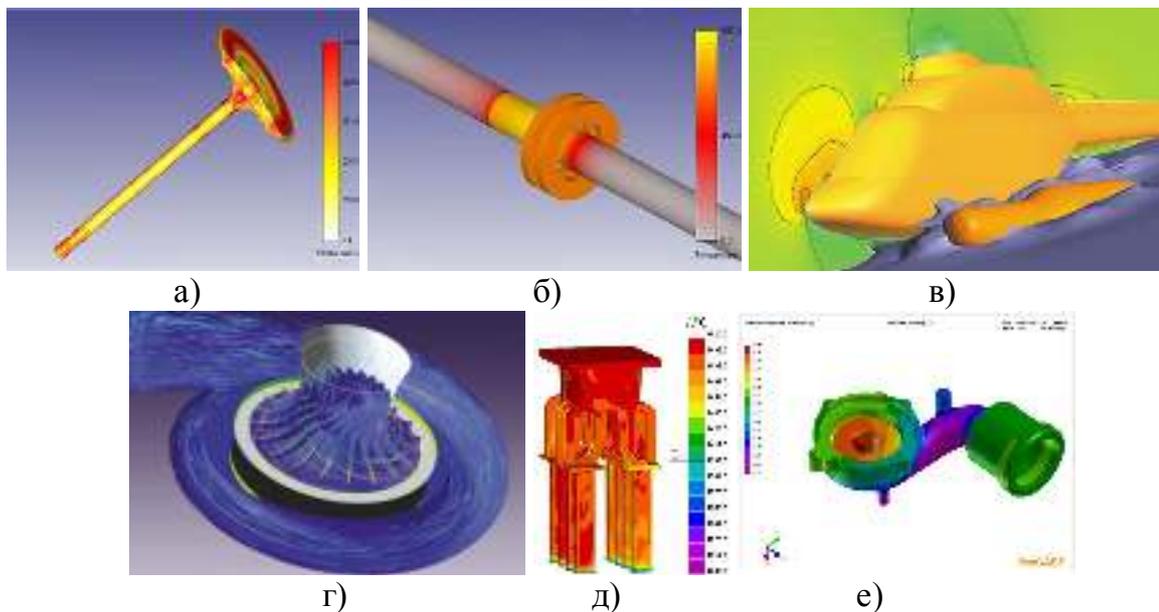


Рисунок 1.1.2 – Результаты прогнозирования в различных пакетах:
 Deform: а), б) распределения температурного поля при объемной и индукционной закалке; Flow Vision: в), г) обтекания корпуса самолета при его приводнении и крыльчатки насоса; ProCast: д), е) распределения теплового поля при заполнении песчано-глинистой формы

Для прочностных расчетов прогнозирование поведения взаимодействующих твердых тел может осуществляться в пакетах Ansys, LsDyna, Abacus, DesignSpace, AI Solutions и др., представляющих собой универсальные программные системы конечно-элементного анализа, реализующих различный математический аппарат. Указанные программные продукты позволяют моделировать и анализировать решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций, задач механики жидкости и газа, теплопередачи, теплообмена и др.

Лидерами в области моделирования технологических процессов в металлургии и машиностроении являются программные продукты Deform и Forming Suite, представляющие собой специализированные инженерные программные комплексы, предназначенные для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки.

Исследование динамики жидкости и газа может выполняться при помощи программного комплекса FlowVision, являющегося интегрированной системой – препроцессор, блок расчета уравнений и постпроцессор объединены и работают одновременно. Это позволяет проводить моделирование и одновременно анализировать его результаты, изменять граничные условия и параметры модели.

ProCAST – современный интегрированный программный комплекс для моделирования процессов литья, позволяющий провести расчет технологии по всем этапам: от заливки и кристаллизации с образованием усадочных дефектов и напряжений, до выбивки, обрезки литников и последующей термообработки для полного контроля остаточных напряжений в готовом изделии. ProCAST позволяет моделировать любую литейную технологию и позволяет спрогнозировать распределение тепловых полей в отливке и форме, оценить уровень возникающих напряжений в отливке и металлической оснастке, а также позволяет рассчитывать цикличные нагрузки (например, при литье под давлением) и т.д.

Также существуют другие компьютерные пакеты, позволяющие осуществить имитационное моделирование различных технологических процессов: StarCD, CFX, Flow3D – для анализа гидрогазодинамических процессов, Samcef,

FideSys, NX CAE, Simulia, HyperMesh, Moldex 3D и др. – для исследования поведения прочностных свойств любых реальных объектов в различных условиях.

Значительный потенциал в плане моделирования процессов, а также возможность реализации конкретных исходных условий (новые материалы, различные математические модели и т.д.) сделали рассмотренные пакеты достаточно популярными среди лидеров мирового машиностроения. Их активными пользователями являются такие всемирно известные предприятия, как BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon/Mobil, Fiat, Ford, General Electric, General Motors, Gillette, GoodYear, HP, IBM, Kodak, Lockheed, Mercedes, Mitsubishi, Motorola, Shell, Siemens, Toyota, Volkswagen-Audi, Volvo, ЗМ, БелАЗ и др.

Таким образом, применение CAE-контуров при проектировании различных технологических процессов позволяет в значительной степени сократить время на технологическую подготовку производства, поскольку позволяет на этапе разработки техпроцесса оценить возможные варианты его течения при различных технологических условиях. При этом существует возможность получать результаты реализации техпроцесса без изготовления опытных партий и периода его отладки, который обычно сопровождается изготовлением продукции, несоответствующей требованиям нормативно-технической документации.

Что касается автоматизации подготовки производства в области механической обработки деталей машин, то существующие САПР ТП не содержат имитационного контура моделирующего результаты выполнения технологического процесса. Это может быть объяснено, прежде всего, отсутствием теоретической базы и математического аппарата, позволяющих прогнозировать результаты механической обработки деталей в широком диапазоне технологических условий.

Наиболее распространенные системы технологической подготовки производства, приведенные в таблице 1.1.1, решают определенный круг важных конструкторско-технологических задач: разработка конструкторской и технологической документации, управление ее оборотом, формирование норм расхода основных и вспомогательных материалов, маршрутов прохождения деталей и сборочных единиц, расчет нормы расхода основного материала, разработка всех опера-

ций технологического процесса, выбор средств технического контроля, средств механизации, автоматизации и транспортирования и др. Структура рассмотренных пакетов в виде иерархически взаимосвязанных объектов – операций и переходов, оборудования и инструментов, конструкторско-технологических элементов детали и элементов операций, делает их достаточно удобными для работы конструктора либо технолога.

Таблица 1.1.1 – Сравнение различных САПР ТП механической обработки

Технологические пределы	САПР ТП								
	ADEM	AutoCAD	CADD	Компас	ProE	Вертикаль	Лоцман	T-FLEX	Unigraphics
Конструирование (CAD)	+	+	–	+	±	+	+	+	–
Проектирование технологии и программирование системы ЧПУ станка (CAM)	+	–	+	–	–	±	–	–	+
Инженерный анализ (CAE)	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Подводя итог вышесказанному можно заключить, что в настоящее время существует программное обеспечение, позволяющее эффективно построить работу технологических и конструкторских служб любого предприятия, как конгломерата, включающего в себя весь жизненный цикл изделия. Эти САПР ТП достаточно развиты и широко представлены на рынке компьютерных программ. Данные обстоятельства делают такие САПР ТП, безусловно, привлекательными для использования на предприятиях, в группах подготовки производства, но нельзя забывать про качественную сторону процесса – быстрое малозатратное производство требуемой детали с возможностью оперативного изменения техпроцесса для выпуска деталей с другими требованиями. Этот неиспользованный в настоящее время резерв повышения эффективности функционирования предприятий заключается в применении CAE-технологий при проектировании технологических процессов обработки деталей.

Так, при проектировании технологических процессов обработки заготовок на станках нередко используются автоматизированные системы размерного ана-

лиза технологических процессов на базе расчета размерных цепей (разработка ЮУрГУ – пакет «КурсАР») [320]. Такая методика на структурном уровне осуществляет прогнозирование эффективности разработанного технологического процесса (обеспечение требуемой точности размеров, чистоты поверхности, отсутствие необработанных поверхностей, анализ величин припусков и т.д.). По результатам решения аналитической задачи – по сути моделирования техпроцесса – возникает этап его корректировки: изменение порядка обработки поверхностей подготовки, комплектов баз, выбранного оборудования и др. Следовательно, размерноточностное проектирование, позволяющее выполнять анализ действующего техпроцесса и вносить корректировки в его структуру и наполнение с целью обеспечения бездефектного выпуска деталей, является инструментом прогнозирования эффективности разработанного технологического процесса.

Компания Oerlikon (Австрия), специализирующаяся на заточке металлорежущих инструментов, в ТПП применяет собственную разработку – имитационную программу CyberGrind. Пакет позволяет при проектировании операции заточки инструмента решать многопараметрическую оптимизационную задачу выбора геометрических параметров заточного инструмента, расчета траекторий перемещения затачиваемого и заточного инструмента, определения скорости резания, величины подачи, глубины резания и т.д. Технолог методом подбора выбирает траекторию движения абразивного инструмента, а также режимы его работы из рекомендуемых. В итоге получается массив данных, характеризующих результаты выполнения операции. После анализа результатов имитации технологического процесса переточки формируются корректирующие действия.

Имитацию зубошлифования червячными ШК позволяет выполнить программа WZL, разработанная в Рейнско-вестфальской высшей технической школе (Германия). Указанное программное обеспечение позволяет определять силу шлифования для параметров, имеющихся в базе знаний, а также по моделям, заложенным в программу на стадии ее отладки (рисунок 1.1.3).

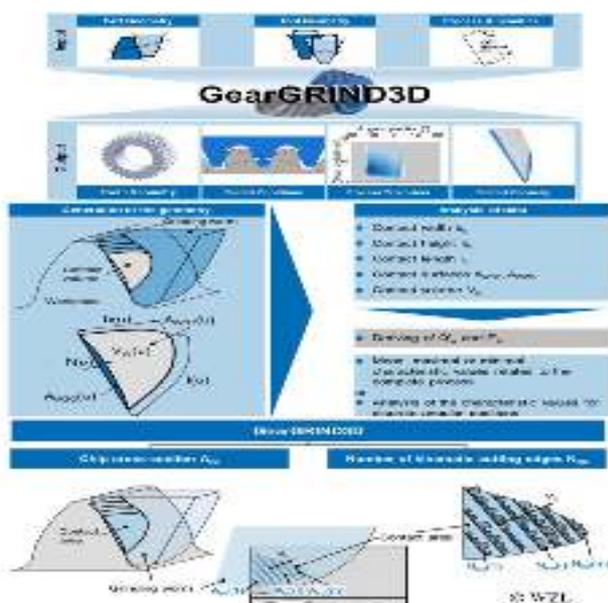


Рисунок 1.1.3 – Фрагмент работы пакета WZL

В связи с вышеизложенным, задачу повышения эффективности труда инженера-технолога в настоящее время можно сформулировать следующим образом. Для технолога необходимо современное инновационное средство технологической подготовки производства, позволяющее на основе комплекса многофакторных математических моделей, описывающих различные процессы, протекающие при обработке деталей на металлорежущем оборудовании, выполнять имитационное моделирование этих процессов в едином информационном пространстве, получая при этом множество возможных результатов выполнения технологического процесса при различных технологических условиях.

1.2. Современные проблемы проектирования операций шлифования

Проектирование операции абразивной обработки – назначение характеристики ШК и выбор режимов шлифования – задача тривиальная и успешно решаемая при помощи справочников общемашиностроительных нормативов режимов шлифования (ОМН) [218, 219]. Такие справочники были созданы как аккумуляция передового опыта эксплуатации абразивных инструментов: большое количество статистического материала собиралось с машиностроительных предприятий страны, обрабатывалось и формировалось в удобный для использования табличный вид. Тот факт, что исходный материал собирался с предприятий различных не только по типу, но и виду производства привел к тому, что различные требова-

ния к выполнению технологической операции достигались разными путями: варьированием параметрами характеристики ШК, режимами шлифования, а также специальной наладкой станков и др.

В справочниках ОМН для учета большого количества технологических требований к выполнению операции шлифования, а также характеристик ШК, принят единый алгоритм построения рекомендаций: для конкретных типовых условий выполнения операции шлифования (обрабатываемый материал, требования по точности, шероховатости, неприжоговости, СОТС и др.) создавались детерминированные решения, содержащие характеристику ШК и режимы шлифования. Для учета условий работы инструмента, отличающихся от типовых, введена система поправочных коэффициентов. Так, в одном из изданий справочника по режимам абразивной обработки для круглого наружного врезного шлифования в качестве исходных условий было шлифование цилиндрической без радиусов и буртов заготовки, из материала I группы обрабатываемости, с отношением длины к диаметру до 7, ШК диаметром 600 мм, характеристики 24AF46M7V ГОСТ 52781-2007. При этом обеспечивалась точность по 2 классу, шероховатость поверхности – Ra 1,25...0,63 мкм. Применялся круглошлифовальный станок с ручной подачей, проработавший непрерывно 10 лет, с измерением выполняемого размера накладной индикаторной скобой [218]. Для учета условий проектируемой операции шлифования, отличных от типовых, в справочнике приводятся 7 поправочных коэффициентов, которые зависят от:

- ГрОМ, точности и шероховатости поверхности;
- размера и скорости ШК;
- способа шлифования и контроля размера;
- формы поверхности и жесткости детали;
- твердости ШК (в т.ч. на подачу и мощность резания);
- точности и жесткости станка.

Таким образом, существующее нормативное технологическое режимно-инструментальное оснащение операций абразивной обработки построено на детерминированных решениях: рекомендация конкретной характеристики ШК и

определенных режимов шлифования. При этом для измененных условий обработки введено множество поправочных коэффициентов. Аналогичным образом решена задача проектирования для всех имеющихся в справочнике схем абразивной обработки (рисунок 1.2.1).



Рисунок 1.2.1 – Порядок проектирования операций шлифования по справочнику [218]

Рассмотренные справочники ОМН предназначены исключительно для крупносерийного и массового производства. Это связано с тем, что в указанных типах производства номенклатура изготавливаемых деталей узка, а размеры партий деталей велики. В таких условиях выгодно следовать рекомендациям справочников ОМН: для каждой осваиваемой партии деталей приобретать абразивный инструмент определенной характеристики, отличающейся от инструмента, имеющегося на предприятии. В этом случае величина подготовительно-заключительного времени, в которое включается время на переналадку станка, замену круга, его балансировку и правку, делится на всю партию деталей и учитывается один раз при запуске технологического процесса. Традиционно на заводах крупносерийного и массового производства имелись складские площади, предназначенные для хранения запаса ШК, предназначенных для обработки конкретных партий деталей.

Кроме того, выбор режимов шлифования осуществляется в отрыве от характеристики инструмента, что не позволяет говорить о назначенном режиме шлифования, как о наиболее эффективном для ШК характеристики, принятой на первом этапе, для реализуемых технологических условий.

Следует отметить, что большинство других справочников по режимам шлифования построены по аналогичной схеме [136, 167, 200 и др.].

В условиях многономенклатурного производства (п. 1.1) предприятию невыгодно для каждой обрабатываемой партии заготовок приобретать абразивный инструмент определенной характеристики, как предписывают справочники ОМН. Кроме того, частая смена абразивных инструментов приводит к существенным потерям в производительности процесса: каждый устанавливаемый на станок ШК должен быть статически отбалансирован, затем в течение длительного времени он подвергается правке, затем повторной балансировке на станке, потом повторной правке и только после этого новый ШК может быть использован в работе.

Так, при круглом наружном врезном шлифовании партии валов диаметром 28 мм, в количестве 240 шт., из стали 18ХНВА, твердостью 22–30 НРС, необходимо использовать ШК 1 600×63×305 24А40НС26К 50 м/с [218]. При припуске на диаметр 0,30 мм, основное время составит 0,22 мин [218]. Остальные составляющие технической нормы времени следующие: вспомогательное время – 0,97 мин, время на обслуживание – 3,18 мин, время на отдых и личные надобности – 0,8 мин [217]. Таким образом, штучное время на операцию составит 5,15 мин (рисунок 1.2.2). Подготовительно-заключительное время составит 23 мин, при этом 18 минут затрачивается на наладку станка – установку круга, наладку прибора активного контроля, наладку приспособления [217]. Понятно, что в течение всего времени, затрачиваемого на переустановку ШК и его подготовку к работе, круглошлифовальный станок простаивает.

В таблице 1.2.1 приведены величины подготовительно-заключительного времени для некоторых групп станков, в соответствии со справочными данными [217].

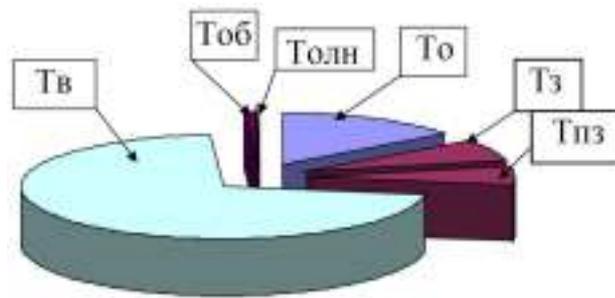


Рисунок 1.2.2 – Удельный вес отдельных составляющих в технической норме времени на партию деталей [217]

Таблица 1.2.1 – Временные затраты на замену ШК [217]

Станки	Высота ШК, мм, до	Составляющие нормы времени, мин		Суммарное время на замену круга, мин
		Время на правку	Время на балансировку	
Круглошлифовальные	40	1,8	10	17,8
	60	2,0	10	18,0
	80	2,3	10	18,3
Плоскошлифовальные	20	1,2	7	13,7
	40	1,4	7	13,9
	60	1,7	7	14,3
Бесцентровошлифовальные	100	2,6	13	22,6
	150	2,9	13	22,9
	200	4,2	13	24,1

Для условий круглого наружного врезного шлифования время на замену ШК составляет 18 мин. Основное время, рассчитанное выше, составляет 0,22 мин. Учитывая размер партии, получаем, что суммарное время работы ШК составит около 53 мин. Принимая во внимание среднюю величину периода стойкости ШК, а также рекомендации по режимам правки можно определить, что суммарное время до полного износа круга составляет 1370 мин [218, 258]. В итоге получаем, что в случае изготовления партии деталей ШК «нормативной» характеристики в условиях многономенклатурного производства с его последующей заменой на другую характеристику ресурс ШК будет использован всего на 3 %. Аналогичная картина будет повторяться для каждой «нормативной» характеристики ШК, используемой в сложившихся условиях производства, в соответствии с рекомендациями справочников ОМН [218, 219].

Таким образом, замена ШК на станке приводит к длительным простоям оборудования, что негативно сказывается на производительности процесса и приво-

дит к экономическим потерям, при этом ресурс работоспособности ШК используется крайне неэффективно. Не исключается ситуация, когда проектирование операции шлифования по нормативному справочнику приводит к тупиковой ситуации – рассчитаны режимы шлифования, выбрана характеристика ШК, которая в настоящий момент отсутствует на складе. В этом случае наладчик станка вынужденно подбирает наиболее подходящий ШК по марке материала, зернистости и твердости из инструментов, имеющихся на предприятии. При этом ему приходится самостоятельно, опираясь исключительно на свой производственный опыт, назначать режимы шлифования, поскольку рекомендации по эксплуатации ШК конкретных характеристик в различных технологических условиях, в т.ч. при обработке разных марок сталей и сплавов, отсутствуют.

Если следовать рекомендациям ОМН, то возникают существенные дополнительные затраты, вызванные прежде всего замораживанием денежных средств: неизвестно, будет ли приобретенный для производства малой партии деталей ШК когда-либо использоваться вновь. После первого применения он отправляется на инструментальный склад. Наличие и постоянное увеличение вынужденного запаса ШК требует расходов на складское хозяйство. Так, по приблизительным подсчетам дополнительная финансовая нагрузка на малое машиностроительное предприятие может достигать 11 млн. руб. в год. В масштабах всей страны речь идет о сумме, превышающей 4,5 млрд. руб. в год [60].

В результате, на предприятиях стремятся изготовить как можно большее количество деталей, различающихся как основным материалом, так и требованиями чертежа – точностью, шероховатостью, ШК одной характеристики, установленным на станке. Возможность выполнения таких операций шлифования подтверждается собранным с различных предприятий машиностроительной отрасли производственным материалом. Так, в таблице 1.2.2, приведены производственные данные по применению ШК характеристик, отличающихся от рекомендованных справочниками ОМН [218, 219].

Видно, что в ряде случаев потеря производительности (увеличение основного времени) превышает 600 % (рисунок 1.2.3). Это вызвано, в первую очередь,

отсутствием рекомендаций по эксплуатации ШК конкретных характеристик в различных технологических условиях: при обработке разных марок сталей и сплавов и получении различной точности и шероховатости обработки.

Таблица 1.2.2 – Производственные данные по эксплуатации ШК различных характеристик

Обрабатываемый материал	Вид операции	Характеристика круга применяемая	Характеристика круга рекомендованная ОМН [218, 219]	Режим резания применяемый $v_{\text{Срэд.}} (v_{\text{Сoc}})$, мм/мин	Режим резания нормативный $v_{\text{Срэд.}} (v_{\text{Сoc}})$, мм/мин	Припуск, мм	Потеря производительности, раз (T_o/T_o норм.)
Сталь 10	Круглое наружное шлифование с радиальной подачей	91AF60L7V11	25AF60P	1,8	0,72	0,4	0,40
40X9C2		A 36 L5V	92AF60P	0,35	1,25	0,38	3,55
5X20Г9АН4		91AF90I5V	92AF60P	0,35	2,56	0,3	7,70
АС35Г2		14AF60M5V	25AF60M	0,52	1,12	0,3	2,20
Сталь 40		91AF54K7V	14AF54L	1,0	2,71	0,3	2,70
20ХГНМ		24AF60LK5V	92AF60M	1,0	1,26	0,3	1,30
Сталь38		24AF60M6V	24AF60M	0,95	1,2	0,348	1,25
12ХН		14AF60M7V	92AF60N	0,44	1,53	0,3	3,60
		24AF90K6V	92AF90M	1,2	1,34	0,3	1,15
Сталь 08кп		Бесцентровое шлифование с радиальной подачей	91AF54L7V	25AF54L	0,6	1,45	0,15
АС35Г2	96AF90M7V		25AF60M	0,715	4,3	0,4	6,20
19ХГН	91AF90P8V		14AF100N	1,13	2,2	0,45	1,95
Чугун 1040	24AF60O7V		14AF70P7V	0,5	0,72	0,03	1,50
40X	Бесцентровое наружное шлифование с осевой подачей	24AF60L7V	92AF46N	(800)	(970)	0,3	1,20

Однако, имеются операции, на которых эксплуатация ШК «ненормативной» характеристики приводит всего лишь к 15...30 % увеличению основного времени в сравнении с нормативными рекомендациями. Также имеется обратная картина: время обработки детали «нормативным» ШК больше времени обработки ШК характеристики, не рекомендованной нормативами. Это свидетельствует об удачном интуитивном подборе режимов шлифования рабочим или наладчиком, а также о том, что реальная зона возможной эксплуатации любого ШК – область его эксплуатационных возможностей, как в плане получения диапазона точностей и шероховатостей обработки, обработки гаммы различных сталей и сплавов, так и обеспечения требуемого уровня производительности процесса – достаточно раз-

мыта и не является детерминированной величиной, как указано в справочниках ОМН [218, 219].

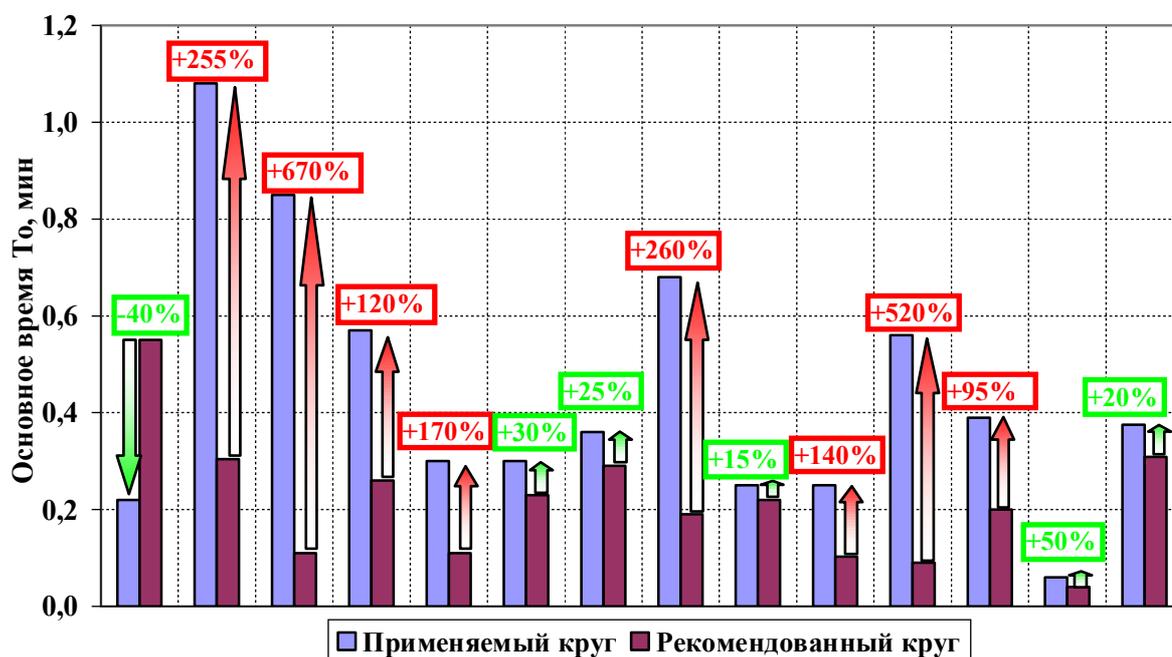


Рисунок 1.2.3 – Сравнение основного времени при использовании круга из техпроцесса и рекомендованного нормативами [218, 219]

Следовательно, любой ШК обладает ресурсом работоспособности, который не является детерминированным решением, как указано в справочниках ОМН, а представляет собой область возможной эксплуатации инструмента – обработки гаммы различных материалов, на разных режимах обработки, с различным уровнем производительности процесса. При этом максимальную величину производительности ШК демонстрирует в «нормативной» точке – при обработке определенного материала, с обеспечением конкретных требований чертежа, в соответствии с рекомендациями справочников ОМН [218, 219]. Данное обстоятельство подтверждается производственным опытом по эксплуатации ШК конкретных характеристик, при обработке различных материалов на разных режимах обработки (таблица 1.2.3).

При этом обращает на себя внимание факт существенного различия достигаемых показателей качества обработки различных обрабатываемых материалов ШК одной характеристики, что идет вразрез с рекомендациями ОМН [218]. Один и тот же ШК применяется, в том числе, для обеспечения различных требований

по качеству обработки на схожих по химсоставу марках материала. Это, возможно, связано с процессами износа абразивных зерен при обработке различных марок сталей и сплавов, а обеспечение различных требований качества обработки связано с варьированием режимами шлифования.

Таблица 1.2.3 – Производственные данные предприятий «ЗМТ» и «ЧТЗ» по эксплуатации ШК различных характеристик

Вид операции	Характеристика круга	Деталь, материал, группа обр.	Требования чертежа		Основное время T_o , мин
			Ra, мкм	Размер	
Круглое наружное с радиальной подачей	1 600×80×305 24AF46OV	Торсион, сталь 45ХН2МФА Ia	2,5	Ø65±0,37	0,6
		Рычаг, сталь 18Х2Н4МА Ib	1,25	Ø12 ^{-0,016} _{-0,034}	0,42
	1 600×80×305 24AF46NV	Валик, сталь 20Х IIa	2,5	Ø15±0,0055	0,52
		Втулка, АЧС VIIa	10	Ø30 ^{+0,088} _{+0,055}	0,7
Круглое наружное с продольной подачей	1 600×80×305 24AF46LV	Труба балансира, сталь 33ХС IIIa	2,5	Ø125 ^{-0,043} _{-0,143}	0,8
		Плунжер, сталь 20ХГН IIIa	0,32	Ø25 ^{-0,002} _{-0,041}	1,2
	116×20×6 24AF90NV	Клапан, сталь 20Х Ia	0,32	Ø25 ^{-0,020} _{-0,041}	1,1
		Валик, сталь 45 Ia	1,25	Ø20 ^{+0,015} _{+0,002}	0,28
Плоское шлифование периферией круга	450×63×203 24AF60LV	Пластина, сталь 40Х IIIa	0,32	26 ^{+0,088} _{+0,055}	0,55
		Крышка, сталь 38ХГН Ia	2,5	18±0,55	1,2

Известен производственный опыт отечественных предприятий по централизованной организации подразделений по подготовке к эксплуатации абразивного и алмазного инструмента [7]. Такие подразделения решают следующие задачи:

- разработка нормативно-технической документации;
- выбор и назначение характеристик абразивных инструментов и подготовка их к эксплуатации;
- осуществление технического надзора с целью обеспечения эффективности операций абразивной обработки.

В условиях ОАО «АвтоВАЗ» задачей отдела абразивного и алмазного инструмента является установление уровня эксплуатационных показателей различных

абразивных инструментов по результатам их промышленных входных испытаний и выдача соответствующих рекомендаций для цехов предприятия. Дальнейшая эксплуатация абразивного инструмента осуществляется в соответствии с разработанными отделом рекомендациями (таблица 1.2.4).

Таблица 1.2.4 – Производственные данные ОААИ ОАО «АвтоВАЗ» по эксплуатации ШК

Характеристика круга по ГОСТ 52781-2007	Вид операции шлифования	Обрабатываемый материал	ГрОМ	Требования чертежа	
				Ra, мкм	IT
14A F60O6V	Круглое с продольной подачей	ВЧ-65	Ив	2,5	6
		Бесцентровое	45	Ia	0,5
		40X9C2	Iб	0,7	6
		40XГНМ	Ia	0,8	6
24AF54L7V	Круглое врезное	08кп	–	1,0	7
25AF60M7V		СЧ-15	VIIa	1,25	6
	СЧ-20	0,63		6	
		35Г2	Ia	0,5	8
		30X	IIa	0,5	6
		ВЧ-65	Ив	0,45	6
		14XГН	Ia	0,6	7
	Внутреннее	20XГНМ		1,2	8
			0,8	6	
	Бесцентровое	19XГН	IIa	0,6	7
				40	1,25
45				1,0	8
43				0,6	6
ВЧ-65				Ив	0,8
Круглое с продольной подачей	72CFND45 (металлокерамика)	–	1,5	8	
	ВЧ-65	Ив	0,7	6	
24A F60L7V	Внутреннее	19XГН	Ia	1,0	8
		12XH2	IIa	1,25	7
		12X13	III	0,63	7
	12X18H10T	1,25		8	
	Круглое врезное	45	Ia	0,8	7
		P6M5Ф3-III	VI	1,25	8
		XH75МБТЮ	V	1,0	7

Также существуют научные работы, направленные на решение частных задач в области режимно-инструментального оснащения операций шлифования в условиях многономенклатурного производства. Так, для сокращения номенклатуры ШК, применяемых для обработки винтовых канавок предложен метод, подра-

зумевающий дополнительный поворот инструмента в плоскости, перпендикулярной плоскости установки круга по винтовой канавке [317]. С.С. Силиным, Н.С. Рыкуновым, Е.И. Суховым разработан расчетный метод выбора характеристик ШК при глубинном шлифовании [280], В.В. Щипанов предложил эмпирические номограммы для выбора зернистости ШК и режимов заточки инструмента из быстрорежущих сталей [327]. О.И. Серховец, А.В. Фесенко, А.Д. Гелло разработали методику оптимизации условий эксплуатации ШК при силовом шлифовании [279]. В работе В.В. Федорова и В.Я. Коршунова предложен термодинамический метод для оптимизации условий эксплуатации абразивного инструмента [301]. Методику оптимизации режимов торцового шлифования жаропрочных сталей и титановых сплавов предложил А.В. Шеин [321], Т. Мацуо и К. Накасако предложили специальную методику выбора характеристики инструмента для обдирочного шлифования сталей и чугунов [186], А.Н. Сеничев, В.Н. Киселев, А.С. Ямников предложили рассчитывать режимы резания для алмазного глубинного шлифования алюминиевых сплавов на основе разработанных моделей [277].

Существуют работы, позволяющие выбирать отдельные параметры характеристики инструмента, например зернистость. Так, оптимальную, с точки зрения микрорельефа обработанной поверхности, зернистость абразивного инструмента Я.И. Солером и Н.М. Тием было предложено находить в условиях моделирования нечеткой логики [285]. Разработанная В.А. Назарьевой модель выбора зернистости ШК, являясь многослойной, позволяет учесть неточность и неоднозначность рекомендаций по выбору параметров характеристики, а также определиться с приоритетом тех или иных возможных технологических решений [201].

Особо выделим работы, направленные на решение задачи изготовления инструментов определенных характеристик, обладающих требуемым уровнем работоспособности. Это труды Н.С. Рыкунова, Е.И. Сухова, Д.И. Волкова [267], Н.А. Чернышова, Г.И. Саютина, А.В. Шарабаева [318], А.П. Курносова, В.А. Борисова [168], А.В. Мурдасова [191]. Разработанная Т.Г. Караченцевой, В.И. Пилинским, Ю.Ф. Юликовой, Г.П. Зайцевым методика выбора конструкции абразивного составного инструмента позволяет выбрать его оптимальные геомет-

рические параметры в зависимости от напряжений, возникающих в теле инструмента в процессе его эксплуатации [133, 134]. В работе В.И. Курдюкова разработаны научные подходы и методики проектирования абразивных инструментов, позволяющих осуществить оптимальное режимно-инструментальное оснащение операции шлифования [165].

Мировые лидеры абразивной промышленности предлагают очень укрупненные рекомендации по выбору инструмента. Так, каталоги компании Saint-Gobain Abrasives (торговые марки Norton, Bay-State, Франция), построены следующим образом: вначале необходимо определить вид применяемого инструмента (отрезные круги, шлифшкурка, ШК и т.д.), а затем по геометрическим и конструктивным параметрам выбрать требуемую позицию инструмента [381]. Аналогичные решения предлагают компании ToolGal (США) [405], Gleason (США) [389], Pferd (Германия) [399], Sia Abrasives (Швейцария) [402], VSM (Германия) [407], Abrasive Technologies (США) [384], Swatycomet [403] (Словения).

Компания Tyrolit (Австрия) и для абразивных и для алмазных инструментов также дает очень общие рекомендации: область применения того или иного инструмента определяется исключительно обрабатываемым материалом [397].

Компания Klingspor Schleifsysteme GmbH & Co. KG (Германия) в основном занимается производством инструментов на гибкой основе и тоже не дает четких рекомендаций по применению своей продукции. Компания предлагает выбрать инструмент в зависимости от обрабатываемого материала и дает общие характеристики результатам операции: чистовое шлифование, агрессивное шлифование, самозатачивание и т.д. [378].

Компании Carborundum (Германия) [376] и Noritake (Япония) [396] предоставляют своим клиентам обзорную информацию о процессах шлифования, областях применения тех или иных абразивных материалов, приводят общие сведения о работе отдельных абразивных зерен в ШК при шлифовании и т.д. Однако не дают каких либо рекомендаций по эксплуатации собственной продукции и проектированию операций абразивной обработки. То же самое относится и к информационным ресурсам компаний Baerhausen [375], 3M [382], Derkom&Klein [387],

Dronco [388] (Германия), Granit Abrasive [390] (Венгрия), Winterthur Shleiftechnik (Швейцария) [400], Reishauer (Швейцария) [401] и др.

Каталог и сайт компании MoleMab (Испания) [394], содержат описанные выше общие рекомендации по выбору характеристики ШК, а также краткие сведения о назначении ограниченного количества параметров режимов шлифования.

Каталоги компании Mirka [393] (Финляндия), предлагающей инструменты на гибкой основе, предоставляют возможность в интерактивном режиме подобрать инструмент для выполнения операции шлифования, однако эти рекомендации носят укрупненный характер, предлагают один и тот же инструмент для различных технологических условий, без назначения режимов шлифования.

Центр абразивных материалов и технологий (г. Москва), предлагающий продукцию производства Norton, в своих рекомендациях выбора характеристик инструмента ориентирует потребителя крайне приблизительно, что также не дает возможности полноценного проектирования операции шлифования [377]. При этом компания предлагает своего рода справочник по абразивной обработке: типичные проблемы, возникающие при обработке деталей, систематизированы и для каждой из них описывается причина возникновения и рекомендации по устранению дефекта.

На информационных ресурсах отечественных абразивных предприятий – «Красногорский абразивный завод» [392], «Волжский абразивный завод» [406], «Московский абразивный завод» [386], «Юргинские абразивы» [408], «ИСМА» [391] отсутствуют конкретные рекомендации по эксплуатации абразивных инструментов. Единственная рекомендация, которую указывают отечественные предприятия – это реализуемая схема шлифования и в лучшем случае условия работы круга или обрабатываемый материал. Наиболее полные рекомендации по выбору инструмента предлагает «Косулинский абразивный завод» [379], «Лужский абразивный завод» [385] и «Запорожский абразивный комбинат» [383]. В этих рекомендациях в зависимости от условий работы инструмента выбирается его связка, от характеристик обрабатываемого материала – марка абразива, условий шлифования – зернистость и твердость инструмента, зависящая от вида обработки. Но

даже описанные рекомендации носят общий характер и не содержат количественных параметров выполнения операции шлифования. В то же время абразивный завод «Ильич» предлагает своим потребителям интерактивный диалоговый каталог. По введенным пользователем условиям выполнения операции шлифования выбирается номенклатура инструмента, которым данная операция может быть реализована [398]. Такой диалог содержит в себе качественные характеристики и может служить примерным ориентиром при проектировании операции шлифования. Кроме этого, на информационном сайте компании предлагается формировать конкретные запросы с целью оптимизации операций шлифования. В запросе подробно описываются условия операции, требования к обработанной детали, цель оптимизации и др. условия. Это требует выполнения исследовательских работ по подбору характеристики инструмента и режимов обработки с целью обеспечения требований, заявляемых потребителем.

Существует большое число отечественных компаний, предлагающих абразивный инструмент. Их каталоги содержат в лучшем случае общие рекомендации по применению инструмента той или иной характеристики для обработки группы материалов, а в основном таблицы выбора геометрических и конструктивных характеристик, при этом невозможно сформировать запросы для определенных условий операции шлифования [373, 374, 380 и др.].

В настоящее время в мировом машиностроении набирает популярность технологический консалтинг. Компании Niles (Германия) [395], TCM (Австрия) [404] и др. предлагают своим клиентам не просто приобрести инструмент, а воспользоваться полным спектром услуг в области поставки и последующего сопровождения инструмента. Сопровождение включает в себя переточку и ремонт затупившегося или сломавшегося инструмента, подбор соответствующих режимов обработки для конкретных операций, переточку имеющегося инструмента для выполнения других операций, нанесение покрытий, хранение и утилизацию отработанного или ненужного инструмента и т.д. Это обстоятельство делает производителя инструмента клиентоориентированным и данные услуги, безусловно, являются востребованными. Все большее число мировых машиностроительных

предприятий делают выбор в пользу технологического сопровождения инструмента со стороны изготовителя. Это предприятия BMW, Daimler, Ford, GM, Huber, Magna, Opel, Powertrain, Swarowski, TDK Epcos, Volkswagen и др.

Таким образом, сложившаяся ситуация в мировом машиностроении вынуждает предприятия максимально использовать ресурс работоспособности каждого ШК. Однако для успешного решения этой задачи в настоящее время отсутствует методическое оснащение для проектирования операций шлифования, позволяющее с минимальными потерями производительности, вызванными использованием ШК «ненормативной» характеристики для конкретных условий обработки, получить деталь, отвечающую всем требованиям чертежа. Указанная задача осложняется тем, что в течение суммарного периода стойкости ШК (времени его работы до полного износа) на станок будут поступать заготовки, изготовленные из разных материалов, при этом требования к качеству обработки также различны. Эта задача может быть решена на основе прогнозирования работоспособности ШК различных характеристик, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях, в том числе и при обработке деталей, изготовленных из разных марок сталей и сплавов. При этом работоспособность должна рассматриваться с учетом времени работы инструмента.

1.3. Оценка работоспособности абразивных инструментов отдельными показателями

Под работоспособностью понимается состояние технического устройства (изделия), при котором устройство выполняет функции в соответствии со своим назначением [47]. Для режущего инструмента, в соответствии с ГОСТ 25751–83 [86], под работоспособностью понимается состояние инструмента (лезвия), при котором выполняется обработка резанием при установленных условиях с установленными требованиями.

Задача оценки уровня работоспособности ШК возникает, в частности, на этапе технологической подготовки производства, когда необходимо принять решение об использовании ШК той или иной характеристики, который обладает определенным ресурсом работоспособности. Нередко производители абразивных

инструментов, предлагая свою продукцию машиностроительным заводам, осуществляют ее испытания в производственных условиях, сопоставляя работоспособность инструментов с существующими аналогами. Во всех случаях необходимы качественные и количественные характеристики, оценивающие работоспособность инструментов. Наиболее распространенными показателями являются требования чертежа готовой детали, при этом ставится еще одно ограничение: выполнение этих требований в течение более длительного времени – периода стойкости инструмента. Такие сведения о работоспособности ШК разных производителей или характеристик могут быть получены исключительно по результатам сравнительных испытаний инструментов при обработке представленных партий деталей. Эти испытания обычно проводятся в производственных условиях машиностроительных предприятий, на оборудовании, участвующем в производственном процессе. На время сравнительных испытаний предприятие вынуждено временно исключать это оборудование из производственного процесса, что приводит к значительным затратам как временным, так и финансовым. В связи с этим, предприятия не заинтересованы в подобного рода испытаниях и стараются их избежать, довольствуясь сертификатами безопасности и соответствия НТД предлагаемой им абразивной продукции.

В настоящее время действующим является ГОСТ 4.349–85, устанавливающий номенклатуру показателей качества абразивного инструмента [87]. Кроме того, в ГОСТ 21445–84 приведен целый ряд показателей надежности абразивного инструмента, которые могут охарактеризовать работоспособность ШК [85]. Однако указанные нормативно-технические документы не содержат методик испытаний ШК для определения показателей их работоспособности, а также рекомендаций по оценке уровня работоспособности инструмента, следовательно, они носят рекомендательный характер и применение тех или иных показателей остается на усмотрение изготовителя абразивной продукции.

Основным документом, регламентирующим номенклатуру выпускаемых ШК, является ГОСТ Р 52781–2007. Указанный стандарт содержит требования к маркировке инструмента, которая должна содержать информацию о геометриче-

ской форме и размерах ШК, материале зерен, их размере, количестве, степени твердости круга и др. конструктивные параметры [89]. Кроме этого, указанный стандарт оговаривает допуски на размеры инструмента, величины радиального и торцового биения кругов, классы их неуравновешенности и др. параметры. Также в нем регламентированы требования к внешнему виду инструмента, его упаковке, маркировке безопасности и пр. В качестве рекомендуемого приложения в стандарте приведены величины надежности ШК: шероховатости обработанной поверхности R_a (R_z) и коэффициента шлифования K , вычисляемого по формуле

$$K = \frac{Q_m}{Q_a}, \quad (1.3.1)$$

где Q_m – объем снятого металла, мм^3 ; Q_a – объем изношенной части круга (с учетом расхода на правку), мм^3 .

Указанные параметры приведены для четырех видов шлифования: круглого наружного врезного, бесцентрового, внутреннего врезного и плоского. В каждом виде дается один набор технологических параметров: обрабатываемый материал, его твердость и режимы шлифования, на которых следует испытывать ШК на соответствие их показателей надежности стандарту. Более того ГОСТ Р 52781-2007 ограничивает условия проведения испытаний, в частности по схеме бесцентрового шлифования стандартом предписаны испытания ШК из карбида кремния 64С зернистостью F90–F120, твердостью I–N, структурой 6–8 при обработке стали 18ХГТ. При испытании кругов в условиях круглого наружного шлифования стандарт предписывает обработку заготовки из стали 45, кругом из белого электрокорунда 25А, зернистостью F46–F60, твердостью I–N, структурой 6–8. Аналогичные условия испытаний приведены для плоского и внутреннего врезного шлифования.

Обращает на себя внимание тот факт, что условия испытаний и величины показателей надежности ШК – коэффициента шлифования и шероховатости обработанной поверхности – достаточно укрупнены: так для ШК зернистостью F46, что соответствует размеру зерна 0,4–0,5 мм и зернистостью F60, что соответствует размеру зерна 0,32–0,25 мм указано, что шероховатость обработанной такими кругами поверхности должна соответствовать 1,25 мкм. В то же время для полу-

чения такой шероховатости рекомендован круг зернистостью F46, что соответствует размеру зерна 0,4–0,32 мм [218]. Аналогичная ситуация сложилась и в отношении второго показателя – коэффициента шлифования.

Кроме этого, в рассматриваемом стандарте не содержится сведений о работоспособности ШК характеристик, отличных от тех, для которых приведены величины коэффициента шлифования и шероховатости поверхности. Это делает невозможным оценку работоспособности ШК других характеристик по стандартным показателям надежности.

Отметим, что при расчете коэффициента шлифования величина изношенной части абразива включает в себя объем инструмента, израсходованного на его правку, но в стандарте отсутствуют рекомендации по правящему инструменту и режимам правки при проведении испытаний ШК. Этот факт ухудшает сопоставимость результатов испытаний со стандартизованными показателями надежности.

Следует также отметить, что в предыдущей редакции указанного стандарта – ГОСТ 2424–83 «Круги шлифовальные. Технические условия», для показателей надежности ШК было приведено 13 видов операций шлифования, включая зубо-, резьбо- и шлицешлифование, для которых вместо показателя «коэффициент шлифования» применен показатель «установленный ресурс». При этом в каждом виде шлифования приводилось от 3 до 7 сочетаний характеристики ШК, марки шлифуемого материала и режимов шлифования. Это позволяло охватить большее количество различного инструмента для выполнения испытаний на соответствие требованиям стандарта.

Таким образом, приведенные в действующих стандартах показатели надежности, оценивающие работоспособность ШК, носят либо теоретический характер – на уровне перечня номенклатуры показателей, терминов и определений, либо справочный, рекомендательный характер, что делает эти показатели необязательными к применению. С одной стороны, это позволяет производителю абразивной продукции соблюдать стандарт исключительно в части требований к геометрическим параметрам инструмента, точности его изготовления, безопасности, что, безусловно, является важным в современных условиях рынка абразивной продук-

ции. С другой стороны, задача оценки ШК с точки зрения возможности его применения в условиях конкретной операции целиком и полностью ложится на машиностроительное предприятие. Даже основной стандарт (ГОСТ Р 52781-2007) не позволяет объективно сравнивать и выбирать по результатам испытаний характеристику ШК. Формальный характер показателей, приведенных в НТД, их укрупненность, привели к возникновению большого количества отдельных показателей для описания работоспособности ШК.

В настоящее время известно более 30 отдельных показателей, предлагаемых для оценки эксплуатационных свойств ШК. Большинство из них представляют собой комплексные критерии, учитывающие различные выходные показатели процесса шлифования. Некоторые показатели приведены в таблице 1.3.1.

Влияние геометрических параметров ШК на его эксплуатационные показатели исследовалось В.И. Муцянко, А.Г. Неижкашей, И.Т. Давыдовым [194], эффективность шлифования литых магнитных сплавов оценивалась В.И. Муцянко и В.Е. Гуриным по величине износа абразивного инструмента [195], условия эксплуатации ШК при силовом шлифовании по критерию шероховатости рассмотрены О.И. Серховец, А.В. Фесенко, А.Д. Гелло [279] и др.

Результатом некоторых работ стали методики определения параметров инструмента и показателей процесса шлифования. Так, методика определения оптимальных параметров рабочей поверхности абразивного инструмента была предложена Н.А. Чернышовым, Г.И. Саютиным, А.В. Шарабаевым [318], оптимизацию условий эксплуатации абразивных инструментов по термодинамическому критерию предложили В.В. Федоров, В.Я. Коршунов [301]. Для оценки эффективности абразивных инструментов, изготовленных одно- либо двустадийным технологическим процессом производства инструмента, Т.Н. Орловой применялся коэффициент шлифования [220]. Режущие свойства ШК фирмы Norton при маятниковом шлифовании алюминиевого сплава оценивались Я.И. Солером, Н.С. Киеном критерием макрогеометрии [287] и др.

Существует также ряд исследований, в которых предлагались показатели, относящиеся к специальным операциям абразивной обработки (таблица 1.3.2).

Таблица 1.3.1 – Существующие отдельные показатели оценки эксплуатационных свойств ШК

№ п/п	Наименование показателя	Расчетная формула	Единица измерения	Учитываемые параметры	Источник
1.	Удельная производительность ШК	$K_y = \frac{Q_m}{Q_a}$	—	Q_m — интенсивность съема металла с заготовки; Q_a — интенсивность износа ШК	Е.Н. Маслов [182]
2.	Коэффициент режущей способности	$K_p = \frac{Q_m}{P_y}$	$\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{мин}}$	Q_m — интенсивность съема металла с заготовки; P_y — радиальная составляющая силы шлифования	
3.	Коэффициент самозатачивания круга	$K_c = \frac{Q_a}{P_y}$	$\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{мин}}$	Q_a — интенсивность износа ШК; P_y — радиальная составляющая силы шлифования	
4.	Коэффициент шлифования	$\mu = \frac{P_z}{P_y}$	—	P_z — нормальная составляющая силы шлифования; P_y — радиальная составляющая силы шлифования.	
5.	Критерий фирмы «Нортон»	$K_q = \frac{c W_m^2}{W_a}$	—	c — коэффициент; W_m — объем снятого с заготовки металла за период стойкости круга; W_a — объем изношенного за период стойкости круга	Г.Б. Лурье [179], В.П. Сиротин, И.В. Харченко [282]
6.	Коэффициент шлифования (удельный съем металла)	$K_{ш} = \frac{W_m}{W_a}$	—	W_m — объем снятого с заготовки металла за период стойкости круга; W_a — объем изношенного за период стойкости круга.	
7.	Изменение режущей способности круга во времени	$k = k_0 \cdot e^{-\lambda t}$	$\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{мин}^2}$	k_0 — режущая способность в начальных условиях; λ — коэффициент, характеризующий надежность реализации процесса во времени (колеблется в пределах 0,03–0,15); t — время работы круга.	
8.	Показатель работоспособности круга	$R = \frac{k}{\lambda \cdot \theta}$	$\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{мин}^2 \cdot \text{град}}$	k — изменение режущей способности круга во времени; λ — коэффициент, характеризующий надежность реализации процесса во времени (колеблется в пределах 0,03–0,15); θ — температура шлифования.	

Продолжение таблицы 1.3.1

№ п/п	Наименование показателя	Расчетная формула	Единица измерения	Учитываемые параметры	Источник
9.	Удельная работа шлифования	$A_y = \frac{P_z V_k}{Q_m}$	$\frac{Н \cdot М}{мм^3}$	P_z — нормальная составляющая силы шлифования; V_k — скорость ШК; Q_m — интенсивность съема металла с заготовки.	С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко [244], В.А. Никифоров, В.А. Носенко, Г.И. Саюгин [202]
10.	Удельная мощность шлифования	$K_N = \frac{N_{ш}}{Q_m}$	$\frac{кВт \cdot мин}{мм^3}$	$N_{ш}$ — мощность шлифования; Q_m — интенсивность съема металла с заготовки	Е.С. Киселев [138]
11.	Эффективная мощность шлифования	$N_{ш} = N_{нн} - N_{хх}$	кВт	$N_{нн}$ — мощность, затрачиваемая на шлифование; $N_{хх}$ — мощность холостого хода станка.	
12.	Фактическая скорость съема металла	$Q_{ф} = K_c Q_n$	$\frac{мм^3}{мин}$	K_c — коэффициент съема металла; Q_n — номинальная скорость съема металла	А.В. Приемышев, Ю.М. Зубарев, В.В. Звоновских [246], Л.Н. Филимонов [303]
13.	Скорость изнашивания ШК	$Q_a = C_a Q_m^m$	$\frac{мм^3}{мин}$	C_a — коэффициент, зависящий от условий обработки (скорость износа круга при $Q_m=1$ см ³ /мин); Q_m — интенсивность съема металла с заготовки.	
14.	Стойкость ШК	$T = \frac{C_T}{Q_m^n}$	мин	C_T — коэффициент, зависящий от условий обработки (стойкость круга при $Q_m=1$ см ³ /мин); Q_m — интенсивность съема металла с заготовки; n — показатель степени, выражающий интенсивность уменьшения стойкости от режима резания (зависит от условий обработки).	
15.	Коэффициент работоспособности ШК	$\beta = \frac{Q_m}{P_y \cdot Ra}$	$\left(\frac{мм^3}{мин \cdot Н \cdot мкм} \right)$	Q_m — интенсивность съема металла с заготовки; P_y — радиальная составляющая силы шлифования; Ra — шероховатость шлифованной поверхности	Н.И. Веткасов [62]
16.		$K_j = \frac{Q_m^2}{Q_a \cdot N_{ш} \cdot Ra}$	$\left(\frac{мм^3}{мин \cdot кВт \cdot мкм} \right)$	Q_m — интенсивность съема металла с заготовки; $N_{ш}$ — мощность шлифования; Ra — шероховатость шлифованной поверхности	

Окончание таблицы 1.3.1

№ п/п	Наименование показателя	Расчетная формула	Единица измерения	Учитываемые параметры	Источник
17.	Энергетический критерий	$W_k = Mv\omega d + \omega V \sqrt{\frac{dD}{1 + \frac{D}{D\omega}}} K$	кВт	M, K – коэффициенты, учитывающие технологические параметры; v, V – скорость детали и круга соответственно; ω – ширина шлифования; d – глубина резания; D – диаметр круга.	С. Rubenstein [437]
18.	Критическая бесприжогова подача	–	мм/мин	–	Л.В. Худобин [314]
19.	Критическая бесприжогова нагрузка	–	Па	–	М.П. Волков [65]
20.	Тепловой критерий	$\frac{\Delta\sigma}{\Delta t}$	мм/мин	σ – толщина пограничного слоя режущей части ШК, подверженного тепловой деформации; t – время, мин	А.Г. Иванов, Д.П. Салова, П.М. Салов, С.Б. Малеева [232]
21.	Качество ШК	–	–	Стабильность параметров характеристики	Е.И. Махаринский [185]
22.	Деформируемость круга	H, φ_1	–	Глубина вдавливания конуса в инструмент	Л.Н. Хшиво [315]
23.	Температурный критерий	Θ	°С	Температура в зоне шлифования	В.И. Пилинский, С.А. Власов, Г.С. Хусаинов [240]
24.	Приведенный кинематический параметр шлифования	$f_{н.ср.} = s_{о.кр.} \cdot t_{р.ср.}$	мм ²	$s_{о.кр.}$ – средняя подача инструмента на оборот; средняя глубина шлифования за один оборот круга.	В.С. Пташников [247]
25.	Коэффициент качества отрезного круга	$K_{i-1} = \frac{T_{i+1}}{T_i}$	–	T_{i+1} – средний ресурс кругов в последующем году; T_i – базовый показатель ресурса кругов.	А.Д. Курносов, В.П. Денисенко, А.В. Косолапов [169]

Таблица 1.3.2 – Работы по оценке работоспособности абразивных инструментов

Инструмент	Автор(ы)	Год
Хонинговальные бруски	Н.И. Богомолов, Е.И. Горбатов, О.Л. Козлов, В.И. Ян [43]	1972
Круги для резвошлифования	С.А. Власов, Ю.Г. Прохоров, В.Ф. Конюхов [64], Л.Д. Мищенко [190]	1972, 1978
Шлифовальная шкурка	Н.В. Сырейщикова, Ф.Я. Корчмарь, В.С. Ярков [293], С.К. Розин, А.А. Пыльнев [260], П.А. Гаврилов [69], Л.Н. Хшиво, А.М. Сарайкин [149], З.Н. Попенкова, М.А. Зайцева, А.А. Ломова [243], В.И. Стрижов [150]	1972, 1975, 1981
Импрегнированный инструмент	Б.И. Никулкин [203], З.И. Кремень, Г.П. Афанасьева, А.Я. Зецеров, А.Н. Лукницкий, Е.И. Карпова [162], А.Я. Братчиков [51], В.И. Васин [61], З.И. Дружинина, И.И. Романец [97]	1972, 1977, 1979
Инструмент из эльбора	В.С. Пташников [249], В.В. Щипанов [328], Г.В. Боровский [49], И.В. Есаулов, В.С. Миротворский, Г.В. Хоромова [109]	1973– 1978
Эльборовое, абразивное зерно	В.Ф. Мгеладзе [187], В.М. Шумячер, Е.С. Данилова, И.О. Пушкарев, Г.М. Мальгинова, Е.В. Славина [326, 252–254]	1973
Бесцентровошлифовальный инструмент	В.А. Еленский, В.В. Марченко, И.Т. Давыдов [108], В.И. Муцялко, Э.Г. Зайцев, Ю.В. Гусев [197]	1973
Профильный инструмент	Р.А. Калитис, Р.В. Строчкус, П.С. Штрюпкус [131]	1974
Внутришлифовальный инструмент	Е.В. Быков, З.И. Кремень [56]	1974
Фибровые диски	О.Ф. Котляров, С.К. Розин [152]	1977
Высокопористые круги	С.А. Попов, Р.В. Ананьян [245]	1977
Микропорошки	М.Н. Голованова, В.В. Равикович [84]	1979
Бакелитовые круги	В.В. Райт, А.В. Мурдасов [192, 256]	1981
Плоскошлифовальный инструмент	Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев, В.В. Звоновских [114]	1981
Керамический инструмент	Н.И. Голишников, Е.В. Караулов [82]	1981
Эластичный инструмент	В.О. Вартанов, В.А. Щеголев, Н.П. Меткин [58]	1981
Лепестковые круги	Ю.И. Иванов, Н.В. Носов, А.Н. Исаков [118]	1982
Пасты	М.Н. Голованова, Б.Н. Ардашников, Г.М. Ковальзон [83]	1982
Сегментный инструмент	L. Dabrowski, M. Marciniak [356]	2001
Круглый инструмент	J-S. Kwak, S-B. Sim, Y-D. Jeong [418]	2006
Инструмент с порообразователем	Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер [35]	2007
Зубошлифовальный инструмент	В.К. Старков, С.А. Рябцев, В.А. Поклад, В.С. Новиков, М. Кайзер, С.В. Костров [289]	2007
Инструмент для электрошлифования	S. Kumar, S.K. Choudhury [417]	2007

Американскими учеными было предложено устройство и способ для контроля ШК, используемых для подготовки рабочих валков, применяемых в производстве листового металла [231]. Ультразвуковая система контроля содержит испытательный стенд, выполненный с возможностью вращения ШК. Затухание ам-

плитуды звуковых волн, проходящих сквозь ШК, регистрируется в регистрирующем устройстве и анализируется в ПК. Профиль индикаторных плотностей проверяемого ШК можно сравнивать с профилями индикаторных плотностей других ШК, в частности тех, рабочие характеристики которых известны. Таким образом, для получения числовых характеристик испытанных ШК необходимо иметь базу данных по величинам эксплуатационных показателей аналогичных инструментов.

Также известен способ контроля режущей способности ШК при помощи одновременной подачи двух световых потоков, расположенных под одинаковыми углами падения в плоскости, перпендикулярной рабочей поверхности ШК. Затупление круга определяют по разности величин зарегистрированных отраженных световых потоков [224].

Изучением износа абразивных инструментов, как показателя процесса шлифования, занимался ряд зарубежных исследователей [352, 364, 370, 419, 459]. Авторами были предложены различные автоматизированные методы контроля и диагностики величины износа ШК при шлифовании.

Электронные свойства инструмента, по мнению Ю.В. Полянского, Ю.М. Правикова, являются основным критерием при выборе характеристики абразивного инструмента и могут служить показателем его работоспособности [242]. По мнению авторов, интенсивное взаимодействие между ШК и заготовкой будет происходить в случае обмена электронами между абразивным и обрабатываемым материалом и наоборот.

Общей особенностью рассмотренных результатов исследований и предложенных в них методик определения отдельных показателей работоспособности абразивных инструментов является то, что они были получены в конкретных условиях выполнения операции абразивной обработки. Это не позволяет считать предложенные показатели универсальными и применимыми для широкой гаммы характеристик абразивных инструментов, схем шлифования, а также обрабатываемых материалов. Большинство показателей были разработаны для оценки эффективности применения инструмента в конкретных условиях: исследование нового состава СОТС, ингибиторов, импрегнаторов и т.д. Кроме того, отдельные

показатели имеют достаточно узкую применимость: их можно использовать для проведения сравнительных испытаний абразивных инструментов разных характеристик или разных производителей для выбора наиболее подходящего инструмента с точки зрения измеряемого показателя. При этом условия проведения сравнительных испытаний должны быть абсолютно идентичными. Иными словами вести прогнозирование работоспособности абразивного инструмента в изменяющихся технологических условиях на основе отдельно взятых показателей работоспособности практически невозможно. Разработать методику проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, базирующуюся на отдельных показателях, также не представляется возможным. Это связано с тем, что информация о работоспособности инструмента скудна и не содержит сведений, полно описывающих эксплуатационные возможности инструмента в различных технологических условиях.

В связи с этим, с точки зрения проектирования операций шлифования, наиболее верным способом учета эксплуатационных свойств ШК на этапе проектирования операции шлифования является комплексная оценка их работоспособности. Это позволит наиболее полно охватить возможный диапазон эксплуатации инструмента и получить его для различных технологических условий. В связи с этим, ряд авторов предлагает оценивать эксплуатационные свойства ШК не по одному показателю, а по их набору – комплексу показателей.

1.4. Комплексное описание работоспособности абразивных инструментов

Работы, посвященные комплексной оценке работоспособности ШК, связаны с многообразием технологических условий операций шлифования и желанием более полного их учета при описании работоспособности инструментов. Наиболее достоверным источником сведений об эксплуатационных свойствах ШК являются их испытания и замер эксплуатационных показателей. Для этого созданы специальные испытательные стенды, оборудованные измерительными контурами.

Обзор литературы показал, что такие стенды позволяют измерять следующие группы показателей:

- силовые и энергетические параметры процесса шлифования;
- геометрические параметры круга и детали;
- параметры рельефа детали и круга;
- параметры вибраций при шлифовании.

1.4.1. Способы измерения эксплуатационных показателей

Для регистрации силовых параметров процесса применяются первичные преобразователи: пьезо-, тензо-, ферро- и индуктивные датчики, сигнал от которых поступает в регистрирующую аппаратуру – электронный осциллограф, самописец или аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер.

Достаточно распространенными являются пьезодатчики, установленные по две пары во взаимоперпендикулярных плоскостях (например, на передний и задний центр круглошлифовального станка) и соединенные в общую схему для уменьшения влияния положения точки приложения силы резания к детали. Недостатком этого способа регистрации составляющих силы шлифования является необходимость тщательной настройки контура, высокие требования к точности размещения тензодатчиков, а также сложность тарировки подобных систем. В работах В.Н. Логинова, S. Shvozaki, M.K. Miyashita для регистрации составляющих сил резания при плоском шлифовании используются пьезоэлементы [174, 448].

Индуктивные преобразователи имеют большую надежность, но и инерционность, по сравнению с тензодатчиками. Такие датчики в основном используются в системах адаптивного управления станками. В конструкции индуктивного преобразователя имеется сердечник, контактирующий с элементом системы СПИД, на которую воздействует сила резания. Наконечник смещается, что регистрируется измерительным прибором.

Также известен способ регистрации силы шлифования при помощи перепада давления в масляных карманах шпинделя станка. Для этого необходима установка в шлифовальную бабку специального датчика, измеряющего перепад дав-

ления масла при обработке. В качестве чувствительных элементов таких датчиков могут выступать как пьезо-, так и тензопреобразователи [75].

Основная проблема, возникающая при измерении составляющих силы резания при шлифовании, заключается в достоверности показания регистрирующей аппаратуры. Одним из решений указанной проблемы стало использование дополнительных направляющих на стойках с узлами трения качения с одной степенью свободы, что позволяет обеспечить передачу ортогональных составляющих силового потока от инструмента на три взаимно перпендикулярных датчика. Данный факт повышает достоверность и независимость определения составляющих сил резания при плоском шлифовании [233]. Для непрерывной регистрации составляющих силы резания при работе на круглошлифовальных станках было создано приспособление с использованием пружинного динамометра и электрического датчика перемещения, в котором пружинный динамометр смонтирован на гайке винтового механизма поперечной подачи шлифовальной бабки [3].

Одновременное измерение размера обрабатываемого образца и подачи ШК позволяет не измерять геометрический износ инструмента, а определять его как разность между измеренными величинами [1]. В результате уменьшилось время испытаний, снизилась их трудоемкость. Однако данное мероприятие применимо к условиям доводочного шлифования, осуществляемого с постоянной силой прижима круга к обрабатываемой заготовке.

Итальянскими учеными предложено независимое устройство для проведения измерений характеристик цилиндров, валков и подобных элементов во время операции шлифования. Устройство снабжено системами определения геометрических и пространственных характеристик обрабатываемой заготовки. Оно работает с возможностью автономного перемещения независимо от перемещения ШК или других частей шлифовального станка и содержит специальные датчики. Измерение геометрических параметров выполняется в четырех точках, что позволяет одновременно выполнять измерения геометрических параметров совместно со структурными или поверхностными измерениями при одновременном выполнении шлифования изделия [235].

Одной из проблем точного измерения величины износа ШК является установка нуля отсчета. Для этого предлагается использовать специальное устройство, снабженное механизмом установки нуля отсчета [2], применять специальное приспособление, снабженное двумя соосными роликами, что позволяет учесть погрешности показания измерительной системы из-за неравномерности проскальзывания роликов [226] или обрабатывать ступенчатый образец [234], с целью создания базы отсчета. Нередко эта база перед началом испытаний круга воспроизводилась на стальной пластинке [179, 441], которая потом сопоставлялась с изношенной частью инструмента.

В основном параметры рельефа рабочей поверхности ШК и шлифованной детали измеряются контактным или бесконтактным методом, путем ощупывания. Так, известно устройство для правки фасонного алмазно-шлифовального круга и способ подготовки устройства к измерению рельефа профиля рабочей поверхности инструмента. При использовании этого способа путем замены правящего инструмента измерительным наконечником с ощупывающей иглой при подключении последнего к измерительной цепи профилографа с записывающим блоком контролируются параметры рельефа рабочей поверхности круга [228].

Предложен способ определения степени засаленности рабочей периферийной части ШК при шлифовании с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Для этого в процессе обработки в клиновом зазор между периферийной поверхностью ШК и поверхностью обрабатываемой заготовки нагнетают смазочно-охлаждающую жидкость и измеряют величину ее гидроаэродинамического давления с помощью бесконтактного датчика [227].

В связи с тем, что испытания ШК с целью измерения их эксплуатационных свойств всегда выполняются на станочном оборудовании, обладающим различными характеристиками жесткости, одним из важных показателей, контролируемых при оценке работоспособности ШК, являются выходные величины параметров вибраций. В дальнейшем эти параметры могут являться косвенными показателями идентичности испытаний ШК, а в ряде случаев могут служить критериями режущих свойств инструмента [299].

Японскими учеными для исследования колебательных процессов, происходящих при шлифовании, в разработанные ими установки включался модуль, состоящий из средств сбора информации о мощности резания, показателях вибраций и силе шлифования, которые измерялись акселерометром и электронными блоками. В качестве регистраторов выходных сигналов ими использовались электронные осциллографы, самописцы и магнитофон [308].

Также известен способ оптического контроля вибраций технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь при шлифовании. Способ заключается в том, что с помощью излучателя в виде лазерного диода формируют лазерный луч, фокусируют его с помощью линзовой фокусирующей системы и направляют на полированную зеркальную поверхность шейки шпинделя. Воспринимают отраженный лазерный луч светочувствительной матрицей, состоящей из фотодиодов, усиливают электрические сигналы с фотодиодов и преобразуют их в цифровую форму в аналого-цифровом преобразователе, корректируют полученные сигналы и подают их на прибор регистрации [229].

Впоследствии было разработано устройство бесконтактного измерения вибраций технологической системы при шлифовании. Устройство содержит усилитель и прибор регистрации, снабжено лазерным излучателем, генератором импульсов, линзовой системой для фокусирования лазерного луча, высокочувствительной диодной матрицей типа ПЗС, состоящей из фотодиодов и аналого-цифровым преобразователем. Преимуществами устройства являются малые габаритные размеры, малое потребление энергии, стабильность измерения, отсутствие юстировки и минимальное время настройки [230].

Р.В. Жигаловым, В.Г. Гусевым, П.С. Швагиревым было изобретено устройство, позволяющее снизить вредное влияние вибраций, вызванных дисбалансом ШК, на качество обработки при шлифовании [236]. Для этого ими разработано специальное электромагнитное устройство, при использовании которого шлам, образующийся в результате шлифования, осаждается на наружной цилиндрической поверхности устройства, а не распределяется неравномерно по поверхности ШК, вызывая его дисбаланс.

Исследования динамических характеристик системы «станок – ШК – деталь», выполненные итальянскими учеными свидетельствуют, что параметры вибраций при шлифовании играют не последнюю роль и носят достаточно информативный характер о работоспособности инструмента [421].

1.4.2. Системы автоматизированного тиражирования сведений о работоспособности абразивных инструментов

Наибольший интерес представляют работы, результатом которых стали базы данных по эксплуатационным показателям абразивных инструментов, выраженные в каких-либо документах, или системы их автоматизированного тиражирования. Результаты таких работ позволяют разрабатывать методики и рекомендации по проектированию операций абразивной обработки.

Так, Н.Н. Васильев предложил определять качество ШК по трем критериям: качеству обработанной поверхности, производительности, стоимости обработки [59]. Для каждого критерия им были предложены несколько численных показателей, определяемых по результатам большого количества экспериментов. Автором была разработана специальная установка – АИК (автоматизированное испытание качества), включающая разнородные блоки, позволяющие измерять комплекс показателей качества кругов:

- количество абразива, выполняющее работу;
- средняя общая неравномерность износа;
- средняя наибольшая неравномерность износа;
- износ круга по среднему радиусу;
- износ круга по наибольшему радиусу;
- производительность (при шлифовании торца штифта или стержня);
- среднее давление резания;
- состояние режущей поверхности;
- количество стружек различного вида;
- размеры стружек различного вида;
- чистота обработки;

- интенсивность структурных изменений;
- крупность выкрашивания абразива и др.

Исследование работоспособности ШК различных структур на установке «УралВНИИАШЧИМЭСХ» по показателям составляющих силы шлифования и износу круга было выполнено В.Т. Ивашинниковым [119].

Д.В. Пашков и Л.В. Ходаков, оценивая влияние степени твердости ШК на их эксплуатационные показатели, ограничивались измерением составляющих силы шлифования P_y , P_z , шероховатости шлифованной поверхности R_a , а также по результатам испытаний рассчитывали коэффициент шлифования и коэффициент режущей способности [238]. В результате ими были получены зависимости указанных эксплуатационных показателей ШК от звукового индекса твердости. Это позволяет рассчитать скорость чистовой подачи для получения требуемой шероховатости поверхности, спрогнозировать силы шлифования на черновом и чистовом этапах шлифования, рассчитать переходный процесс и провести оптимальную разбивку припуска на черновой и чистовой, т.е. осуществить проектирование операции шлифования по результатам проведенных испытаний.

В исследовании В.И. Муцянко и А.Г. Неижкаши [198] была предложена методика экспериментального определения эксплуатационных показателей ШК с ограниченным временем испытания, пропорциональным оптимальной стойкости данного круга при круглом наружном врезном шлифовании стали 45. На базе такой методики было предложено начать разработку нормативов эксплуатационных показателей ШК различных характеристик. Эксплуатационные свойства при этом, опять же предлагалось оценивать по стандартизованным показателям: коэффициенту шлифования, расходу ШК и шероховатости шлифованной поверхности.

В Уральском филиале ВНИИАШ в 1984 г. был создан стенд, позволяющий измерять эксплуатационные показатели торцешлифовальных кругов [4]. Набор измеряемых параметров включал величину износа ШК, текущий размер заготовки, величину съема металла, составляющие силы резания P_y , P_z , а также мощность, затраченную на шлифование. Кроме того, в ряде случаев контролировалась температура шлифуемой поверхности заготовки и волнистость рабочей поверхно-

сти ШК. Механическая часть станда была реализована на базе станка 312М, а электрическая – с применением электропреобразователей, усилителей и самопишущих приборов. Данный стенд позволял отслеживать изменение эксплуатационных показателей во времени работы ШК.

В.А. Никифоров, В.А. Носенко и Г.И. Саютин для оценки результатов шлифования жаропрочных сталей и сплавов предлагали следующий набор контролируемых параметров: составляющие силы шлифования P_y , P_z , коэффициент шлифования, шероховатость поверхности и удельная работа шлифования [202]. Выполненные ими испытания различных кругов с применением разных марок СОЖ позволили подобрать наиболее оптимальное их сочетание для шлифования труднообрабатываемых жаропрочных сплавов.

Для оценки эффективности электрокорундовых кругов, работающих по схеме плоского высокоскоростного шлифования А.В. Приемышевым, Ю.М. Зубаревым и В.В. Звоновских был предложен следующий набор контролируемых параметров: период стойкости ШК, скорость его изнашивания, его удельный износ и шероховатость шлифованной поверхности [113, 246]. В результате ими были получены эмпирические зависимости указанных показателей от режимов операции шлифования, что позволило сделать вывод о том, что высокие скорости резания позволяют с большей эффективностью шлифовать нержавеющей и конструкционные стали ШК из белого электрокорунда.

Ю.С. Багайсковым и В.М. Шумячером была оценена эффективность введения порообразователя для улучшения структурно-механических и эксплуатационных свойств абразивных инструментов [35]. В качестве комплекса эксплуатационных показателей, по которому оценивалась эффективность применения различных порообразователей, были приняты составляющие силы шлифования – P_y , P_z , коэффициент шлифования K и шероховатость шлифованной поверхности R_a .

В исследованиях В.В. Федорова и В.Я. Коршунова были проведены комплексные исследования взаимной связи закономерностей и термодинамических характеристик процесса шлифования металлов [302], для чего авторами был предложен следующий набор показателей процесса шлифования:

- производительность шлифования;
- мощность резания;
- интенсивность теплового эффекта шлифования;
- температура на поверхности шлифования.

В результате исследования авторами были предложены термодинамические характеристики процесса:

- удельная работа шлифования;
- критическая плотность внутренней энергии;
- коэффициент полезного действия процесса шлифования, представляющий отношение между первыми двумя параметрами.

Предложенный энергетический подход к оценке эффективности процесса шлифования позволил создать интегральные показатели, характеризующие эффективность и качество процесса шлифования металлических материалов.

В зависимости от особенностей обработки детали в наборе показателей могут появляться показатели, характерные для конкретной технологии шлифования, контроль которых играет важную роль в проектировании, изготовлении, а в дальнейшем и эксплуатации инструментов. Например, при оценке работоспособности кругов из сверхтвердых материалов – эльбора и синтеркорунда, стоимость которых достаточно высока, в набор показателей работоспособности инструмента был введен размерный износ круга и мощность, потребляемая на резание [289].

А.Е. Коротковым и Г.М. Дубовым для оценки влияния формы зерен отрезного круга на его работоспособность был разработан испытательный комплекс, позволяющий оценить эксплуатационные характеристики отрезных кругов, изготовленных по технологии с контролируемой формой зерна. При этом в качестве набора показателей ими были предложены интенсивность съёма металла, износ инструмента, эффективная мощность шлифования, температура резания, разрывная прочность круга и коэффициент шлифования [144].

В Ульяновском государственном техническом университете был разработан стенд для испытаний смазочно-охлаждающих жидкостей и ШК, позволяющий выполнять экспресс-испытания с обеспечением постоянного (стабильного) кон-

такта между рабочими поверхностями образца и ШК. В результате повысилась достоверность результатов испытаний, что значительно повышает точность оценки эффективности применения конкретной СОЖ [225].

Также исследовалось внутреннее [368], круглое наружное центровое шлифование [434], а также бесцентровое шлифование [449]. Основным результатом указанных работ стало установление взаимосвязи между режимами шлифования и основными выходными показателями процесса – силой шлифования и шероховатостью обработанной поверхности [451].

Описывать работоспособность ШК комплексом показателей предлагал С.Н. Корчак [146]. Для этого на различных режимах обработки разных марок сталей были испытаны ШК, различающиеся только показателем твердости и получены сведения об эксплуатационных возможностях инструментов.

Методику ускоренных эксплуатационных испытаний ШК предложили В.И. Муцянко, Б.И. Никулкин, Д.Ф. Шпотаковский [199]. В результате возможно получать данные по скорости съема материала, величине износа ШК, шероховатости шлифованной поверхности. В качестве стойкости ШК принята величина общего уровня колебаний технологической системы.

Показатели работоспособности зубчатых хонов на различных связках исследовались В.П. Мануниным, Ю.С. Багайсковым [181]. Результатом исследования являлись рекомендации по применению инструментов для хонингования, изготовленных на различных связках.

Изучением влияния химического состава корундовых инструментов на показатели шлифования быстрорежущих сталей занимались Ю.Г. Кравченко, Ю.Н. Логинова, А.В. Гордеев [159, 160]. В итоге была разработана укрупненная методика выбора характеристики инструмента для выполнения операций заточки.

Методика испытания абразивных паст для определения показателей их работоспособности была предложена В.Н. Гридневым, Э.В. Анисимовым, А.З. Рамм [91]. Методика позволяла по результатам испытаний абразивных паст определять величины съема материала и шероховатости обработанной поверхности по результатам эмпирической регрессии.

В целях замены импортного абразивного инструмента, применяемого на АвтоВАЗе отечественными аналогами А.Д. Курносовым, А.П. Рожковой, Л.И. Богачевой, Н.С. Нефедовой был выполнен комплекс исследовательских работ, в результате чего было предложено методическое обеспечение для оценки работоспособности ШК, получаемой по результатам их прямого испытания и сопоставления с импортными аналогами [166].

Работоспособность кубонитовых ШК при обработке быстрорежущей стали исследовалась Э.А. Тагиевым, А.М. Гаджитовым [294]. Им удалось определить оптимальную зернистость инструмента и режимы глубинной заточки инструментов из быстрорежущей стали, обеспечивающих высокую производительность и качество обработанных поверхностей, а также минимальный расход инструмента.

Комплексное исследование эксплуатационных свойств ШК с переменной характеристикой было выполнено Б.И. Никулкиным [204]. Автором был сделан вывод о стабильности эксплуатационных показателей таких инструментов.

Для определения степени эффективности применения СОЖ той или иной марки в условиях Горьковского автозавода Л.И. Кардашиным, Ю.Б. Редозубом, Ю.Г. Ворониным проведено исследование, в котором в качестве показателей оценивались величины съема металла, удельной производительности процесса, износа ШК и содержание остаточного аустенита в обработанной поверхности [135].

Достаточно полные и всесторонние исследования шлифования титановых сплавов выполнены Г.И. Саютиным и В.А. Носенко [273]. В итоге ими даны рекомендации по выбору характеристики инструмента и режимов шлифования для реализации операций шлифования заготовок из титановых сплавов.

В.В. Каминской, Л.Н. Цейтлином и Л.В. Марголиным предложена методика оптимизации проектирования операций шлифования на станке с ЧПУ [132]:

- разработка структуры операции на основе информации, содержащейся в исходной технической документации;
- оптимизация на основе априорной информации, получаемой при тестовых испытаниях;
- оптимизация на основе информации, получаемой в процессе обработки.

Японскими учеными в 1971 году была предложена установка, позволяющая определить шлифуемость любого обрабатываемого материала для последующего расчета оптимальных условий обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов [454].

Установка состоит из высокоскоростного (до 90 м/с) круглошлифовального станка и нескольких специальных измерительных контуров для получения различных динамических показателей, измеряемых непосредственно на установке, включающих следующие показатели:

- износ ШК;
- потребляемая мощность;
- вибрации заднего центра;
- нормальная и тангенциальная составляющая силы шлифования;
- поверхностная температура шлифуемого образца;
- диаметр образца;
- шероховатость поверхности (измеряется вне установки).

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1.4.1. Результат испытания – на рисунке 1.4.2.

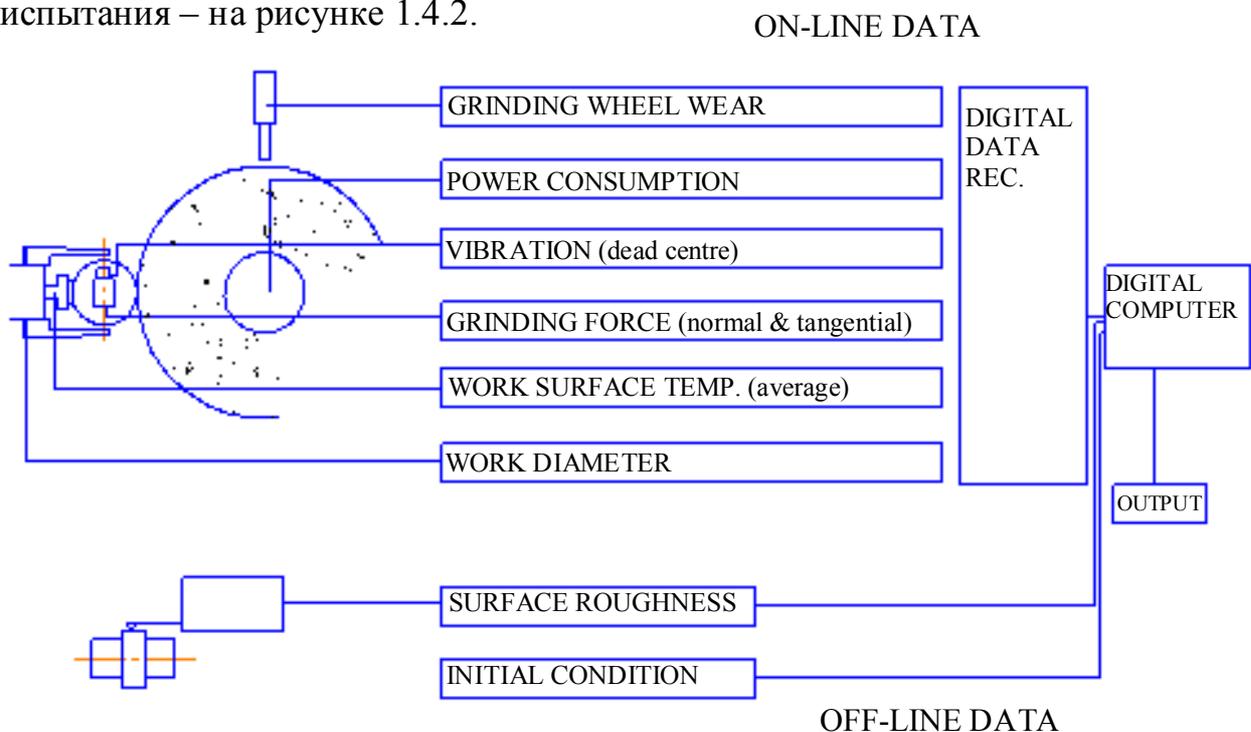


Рисунок 1.4.1 – Установка для испытания ШК [454]

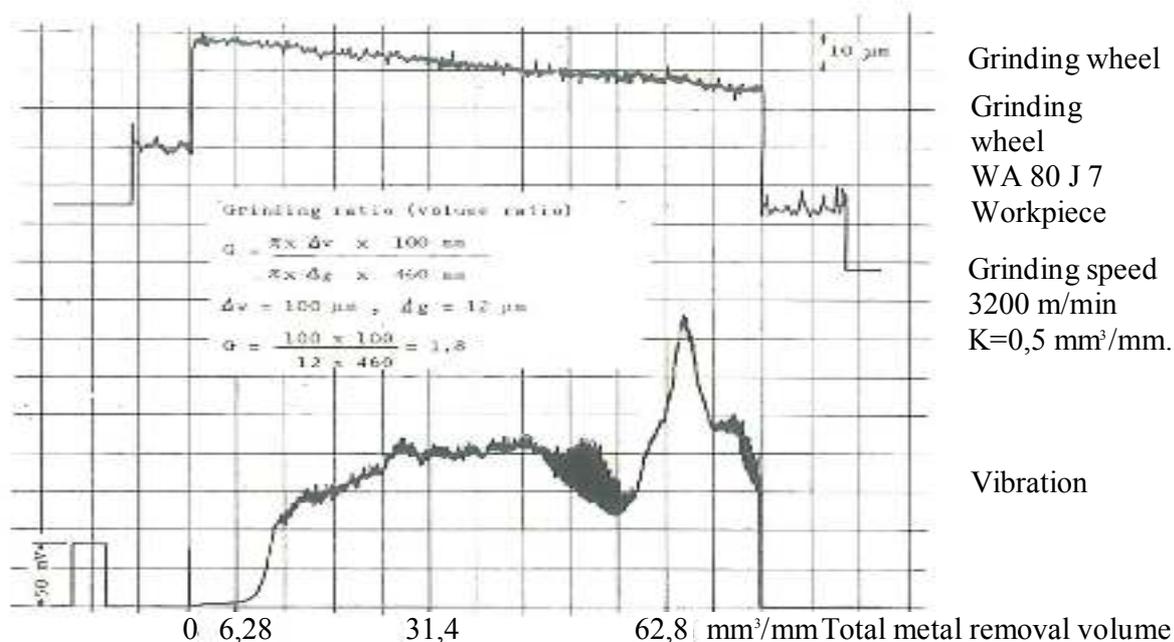


Рисунок 1.4.2 – Фрагмент карты шлифуемости материалов [454]

Данные, поступающие от соответствующих измерительных контуров, передаются в цифровой регистратор, после чего – в персональный компьютер. В компьютере происходит обработка полученных данных и рассчитывается режущая способность инструмента и его коэффициент шлифования. По окончании цикла испытаний выдается распечатка результатов в виде графиков-номограмм (рисунок 1.4.3).

Обрабатываемость материала определялась по отношению к эталонному образцу из стали 45 в процентах, для этого производился расчет параметров обработки, включающих:

- приведенный коэффициент шлифования K;
- объемный коэффициент шлифования G;
- энергия шлифования U;
- шероховатость поверхности Ra – F.

Рассматриваемый стенд позволяет оперативно, с низкой трудоемкостью, в автоматизированном режиме определять шлифуемость любого материала, что позволяет для конкретных условий выполнения операции шлифования назначить оптимальный режим работы ШК и обеспечить выполнение требований чертежа детали.

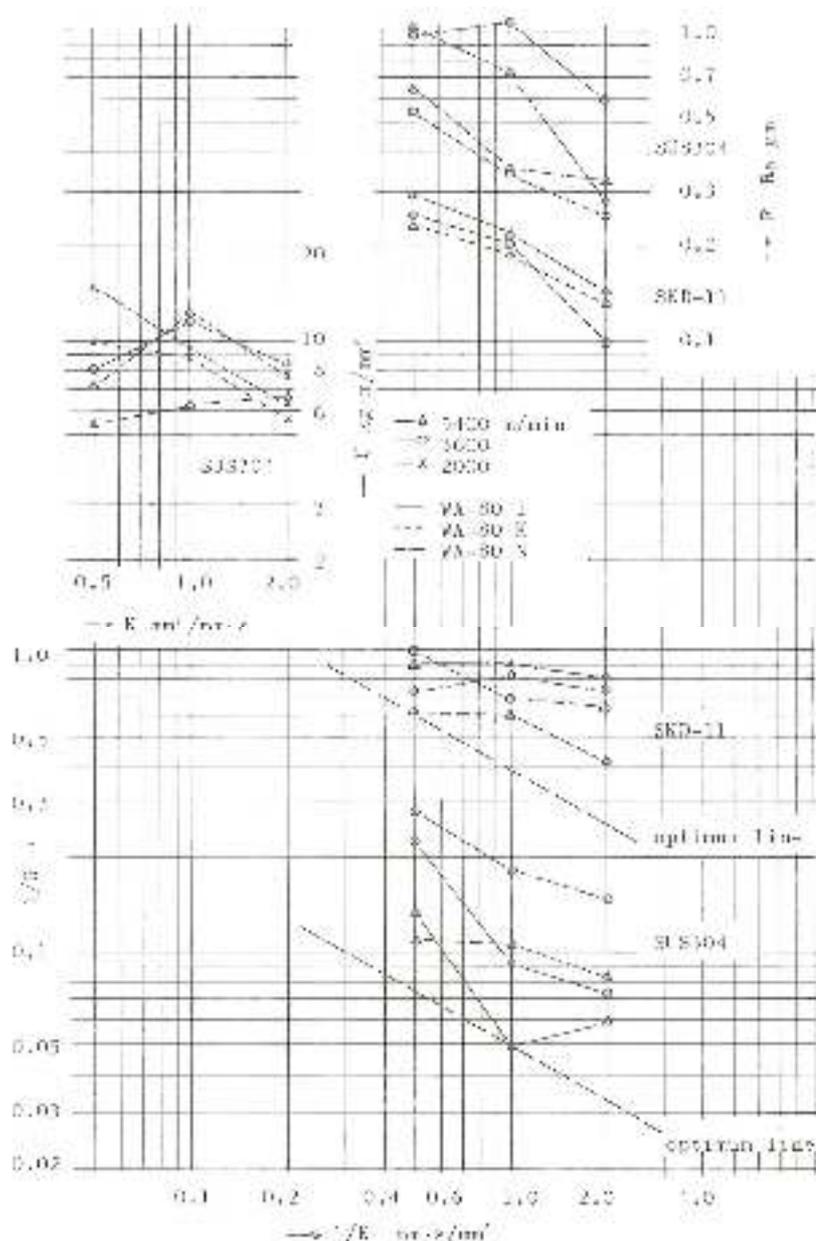


Рисунок 1.4.3 – Фрагмент карты шлифуемости материалов [454]

Однако такой метод определения показателей работоспособности инструмента не позволяет распространить полученные по результатам стендовых испытаний данные на другие схемы обработки или ШК других характеристик.

Исследования, направленные на комплексное описание работоспособности абразивного инструмента были развиты французскими учеными [332, 433]. По результатам испытаний были созданы карты шлифования (рисунок 1.4.4). Набор показателей, приведенный в карте шлифования, отвечает основным требованиям, предъявляемым к операции шлифования, связанным с получением годных деталей. Показатели шлифования, указанные в карте, приводятся в зависимости от эк-

вивалентной толщины стружки – h_z , являющейся обобщенным показателем режима резания. Этот факт затрудняет использование карты шлифования для непосредственного проектирования операции шлифования (назначения режимов резания), поскольку для перехода к управляемым в процессе обработки параметрам необходимо выполнять дополнительные расчеты.

Шлифовальный круг	24А40СМ2К ШШ 300×40×127
Заготовка	$\phi_0=60\text{мм}$; $B=20\text{мм}$
Режим шлифования	$V_k=30\text{ м/с}$; $V_d=30\text{ м/мин}$
Правильный инструмент	Карацлат алмазный
Режим правки	$S_{pr}=0,4\text{мм/мин}$; $S_{ocn}=0,03\text{мм/ав.с}$ I–I

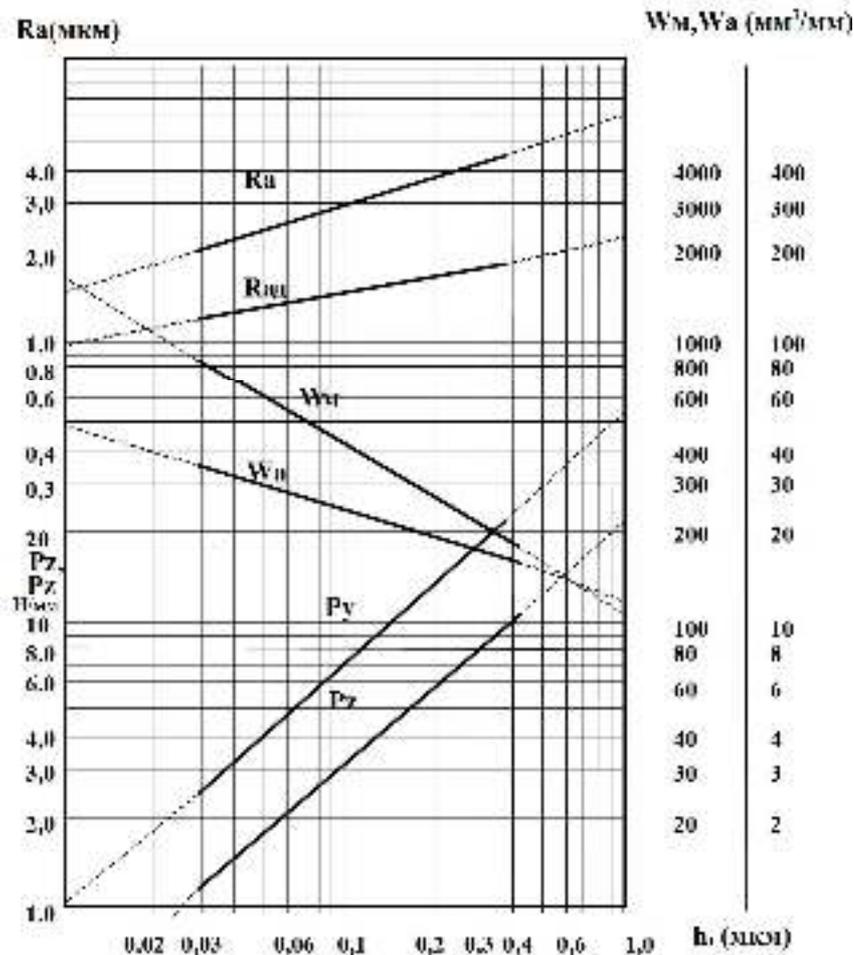


Рисунок 1.4.4 – Карта шлифования [332, 433]

В процессе работы над картами шлифования R. Snoeys и M. Maris [450] разработали алгоритмы для автоматизированных систем создания карт шлифования, а в дальнейшем создали алгоритм проектирования операции шлифования на основе данных карты [427].

Простота и наглядность карт шлифования делают их очень удобными для проектирования шлифовальных операций, однако область их применения ограничена узкими рамками условий обработки, при которых выполнялись испытания инструмента. Содержащиеся в карте сведения об эксплуатационных свойствах ШК получены при обработке определенной марки стали в условиях конкретного вида шлифования. Кроме того, показатели карты шлифования измерялись как средние величины за определенное время работы инструмента. Однако это время в рассмотренных документах никак не учтено. В каждом конкретном случае критерием для окончания шлифования и начала правки ШК может служить тот или иной параметр процесса (допустимая сила шлифования, предельная шероховатость поверхности, появление прижогов, огранки, волнистости на обработанной поверхности и т.д.).

Построение карт шлифования является трудоемким процессом: существенных затрат времени требуют как само испытание ШК – сбор информации о его работоспособности, так и обработка полученных данных. В результате этого сведения о работоспособности инструмента должны быть представлены в удобном для использования виде.

Для сокращения трудоемкости испытаний абразивных инструментов в работе Ю.С. Ройтбурга и Ж.С. Раввы созданы специализированные испытательные стенды «Алмаз» нескольких поколений, которые позволяли испытывать алмазные ШК на операциях круглого шлифования с продольной подачей [261]. Эти стенды управлялись с помощью реле времени, блоков конечных выключателей, измерителей параметров шлифования, блоков аналоговой переработки информации и т.д. Обработка информации в рассматриваемых системах осуществлялась экспресс-анализом и визуальной индикацией основных показателей шлифования – силы резания и объема снятого металла. По окончании испытаний вычислялись относительные коэффициенты K_p и K_t :

$$K_p = \frac{\overline{P}_y}{P_{эт}}; \quad K_t = \frac{\overline{t}_{сп}}{t_{эт}}, \quad (1.4.1.)$$

где \overline{P}_y , \overline{t}_{cp} – средние величины силы шлифования и объема снятого металла соответственно; $P_{эт}$, $t_{эт}$ – эталонные значения тех же величин.

Результаты испытаний хранились в аналоговом запоминающем устройстве. Указанные параметры усреднялись по десяти точкам [261].

Компания General Electric разработала автоматизированную установку для испытаний ШК из боразона [331]. Установка создана на базе круглошлифовального станка и позволяет измерять следующие показатели процесса шлифования:

- износ ШК;
- температура в зоне контакта;
- сила шлифования;
- мощность и ток двигателя привода круга;
- скорость вращения и подачи ШК.

Известны системы автоматизированного создания и тиражирования баз данных режимов шлифования и абразивных инструментов Schleiften INFOS [410, 416] и MetCut [414]. Эти системы предусматривают накопление банка исходных данных по результатам испытаний ШК. Затем полученная информация обрабатывается, строятся математические модели показателей шлифования, на основе которых может быть выполнена оптимизация конкретной операции шлифования для конкретного потребителя. Таким образом, эти системы охватывают круг определенных потребителей информации и результатом их работы являются эмпирические математические модели показателей работоспособности ШК – шероховатости шлифованной поверхности, составляющих силы шлифования и др.

Наиболее полными работами в направлении автоматизации построения карт шлифования по результатам стендовых испытаний ШК являются труды Б.А. Глаговского, Э.С. Евсевича, З.И. Кремня, Л.И. Линдунена, П.С. Носова, Г.Ш. Ройтштейна, И.Х. Стратиевского и др. [72–79, 107, 161, 173, 211, 212, 262 и др.].

Учеными ВНИИАШа выполнены исследования в области эксплуатации абразивных инструментов, которые позволили осуществить управление технологическими процессами, создать методы и средства контроля свойств инструмента,

разработать нормативно-техническую документацию, регламентирующую показатели его работоспособности [266].

В результате была создана система автоматизированных испытаний абразивного инструмента, архитектура которой включает:

- базовый автоматизированный испытательный комплекс (БАИК);
- заводские автоматизированные испытательные стенды (ЗАИС).

Одним из основных условий функционирования БАИК является проведение испытаний эталонных абразивных инструментов, обеспечение образцовой контрольно-измерительной аппаратурой и необходимого метрологического обеспечения испытаний. В 1976–78 гг. был разработан и запущен в эксплуатацию БАИК, позволяющий выполнять испытания ШК, диаметром 500–600 мм в условиях врезного шлифования, с рабочей скоростью до 100 м/с и подачей до 30 мм/мин. Основной задачей при запуске БАИК стала разработка и создание измерительной подсистемы и сочленение ее с ЭВМ, позволяющей осуществлять измерения показателей в реальном времени [72]. С помощью измерительной подсистемы осуществляется измерение параметров, необходимых для определения динамических характеристик инструмента, а также для работы стенда в целом.

В 1982 году Г.И. Буториным, А.А. Кошиным, В.М. Исаковым, Е.И. Ардашевым была высказана идея о возможности создания для каждой партии ШК набора стандартизованных характеристик, отражающих работоспособность инструмента в широком диапазоне его использования: при изменении требований качества обработки детали такой набор показателей позволит выбрать наилучшие режимы шлифования, либо подобрать наиболее подходящий ШК [52–54]. Авторами была предложена графическая реализация набора эксплуатационных показателей (рисунок 1.4.5).

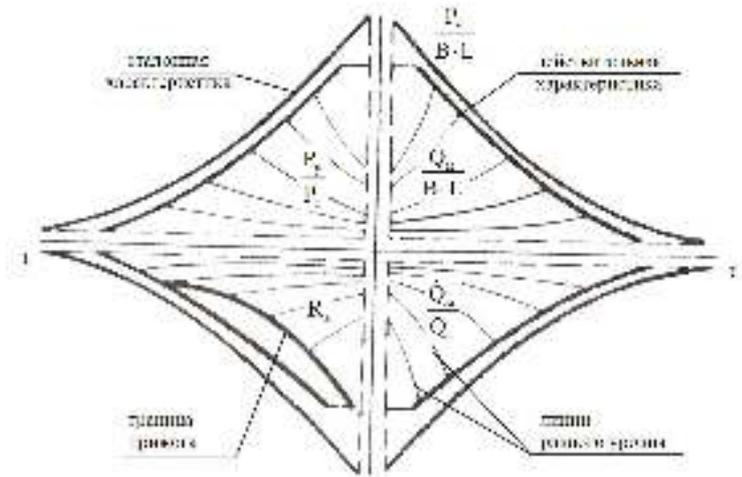


Рисунок 1.4.5 – Эксплуатационная характеристика ШК [52–54]

В дальнейшем, под руководством проф. С.Н. Корчака был разработан паспорт эксплуатационных показателей ШК, в котором применены расчетные модели составляющих силы шлифования, впервые связанные с текущим изменением параметров рельефа ШК [122, 125, 126]. Параметры рельефа ШК, формирующегося в процессе обработки (число режущих зерен, расстояние между зернами и величина относительной опорной площадки затупления), были описаны в работе Д.В. Исакова [123, 125, 127]. В итоге разработана методика построения паспортов эксплуатационных показателей ШК разных характеристик. На базе полученных теоретических зависимостей показателей шлифования Д.В. Исаковым разработан паспорт эксплуатационных показателей ШК (рисунок 1.4.6). В паспорте приводится возможный диапазон варьирования силовых нагрузок на круг (величин подачи), который связан с диапазоном получаемых точностей и шероховатостей, с расчетом для каждой обрабатываемой детали основного времени обработки (производительности) и стойкости кругов, их расхода и разной экономичности обработки [122, 125].

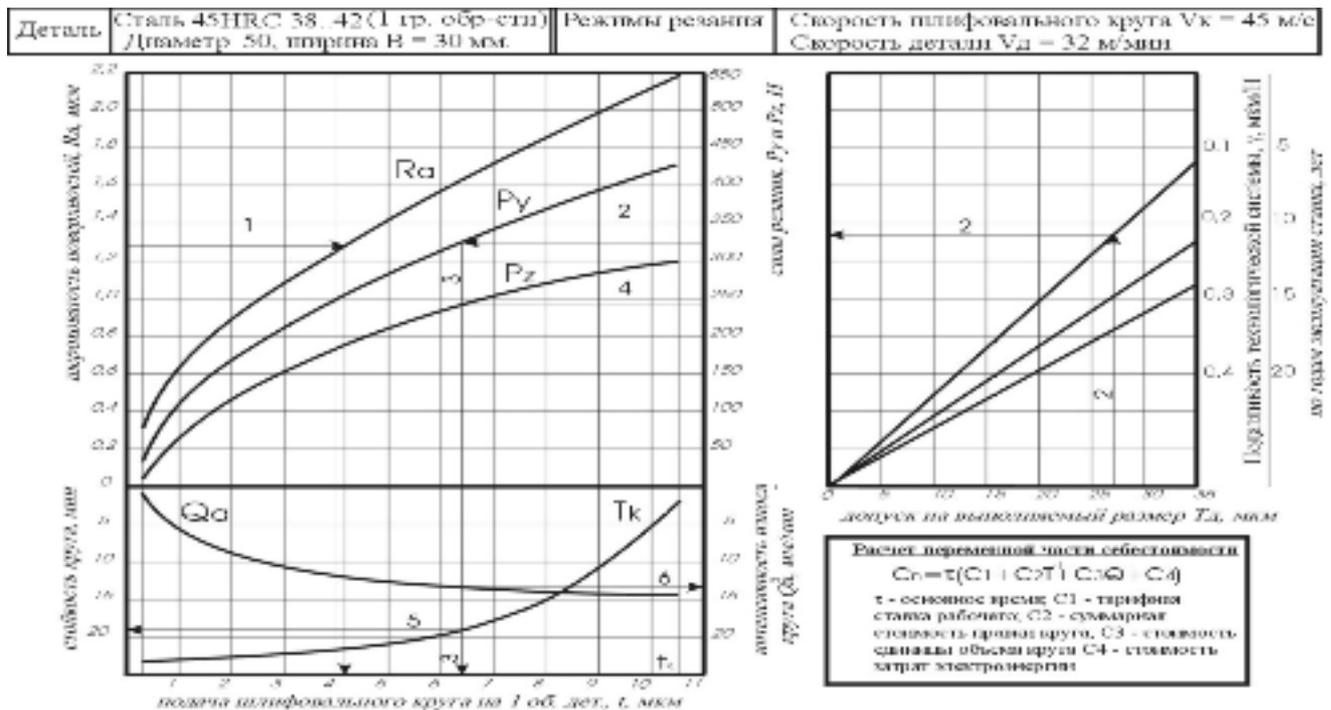


Рисунок 1.4.6 – Паспорт эксплуатационных показателей ШК 1 500×40×305 24A 25H CM1 6КПГ 50м/с ГОСТ 2424–83 [122, 125]

Паспорт включает в себя:

- радиальную составляющую силы шлифования – P_y ;
- нормальную составляющую силы шлифования – P_z ;
- шероховатость шлифованной поверхности – R_a ;
- стойкость ШК – T_k ;
- интенсивность износа ШК – Q_a .

Износ ШК, в отличие от карты шлифования, представлен в виде интенсивности износа, что является существенным достоинством паспорта эксплуатационных показателей. Кроме непосредственно эксплуатационных показателей инструмента в паспорте присутствует дополнительный блок, в который включены:

- податливость технологической системы η ;
- срок эксплуатации станка;
- экономические показатели операции шлифования.

Наличие данных о характеристиках технологической системы, в которой эксплуатируется ШК, а также возможность расчета технологической себестоимости операции шлифования, выполняемой данным кругом, делают паспорт эксплуатационных показателей более информативным с точки зрения описания всей

операции шлифования, в сравнении с ранее рассмотренными технологическими документами.

В качестве учитываемого фактора выступает подача ШК – t , что является существенным достоинством паспорта ШК в сравнении с картой шлифования. Однако предложенный паспорт обладает рядом существенных недостатков. Во-первых, так же как и в карте шлифования (см. рисунок 1.4.4), показатели шлифования рассматриваются как средние – за время испытания ШК. Время испытания инструмента в рассматриваемой работе принимается равным периоду стойкости ШК, при этом критерием периода стойкости служит 30...40 % увеличение величины силы шлифования, в сравнении с относительно стабильным режимом работы ШК или момент возникновения на обработанной поверхности прижогов [124]. Однако не указано, что подразумевается под стабильным режимом работы ШК. Во-вторых, параметры точности обработки (допуск на обработку IT), характеристики технологической системы (срок службы станка, податливость технологической системы), а также экономические показатели операции механической обработки (стоимость единицы объема круга, тарифная ставка рабочего, стоимость правки и т.д.) не являются факторами, зависящими от режущих свойств ШК. Впоследствии Д.В. Исаковым была предложена методика системных испытаний ШК [124], на основе которой можно выполнять испытания различных ШК и формировать банк данных эксплуатационных паспортов, содержащих эксплуатационные характеристики инструмента.

В работе Е.П. Калинина [130] предложена методика управления производительностью процесса шлифования на основе автоматического изменения режимов обработки. В основу методики положен учет различной степени износа абразивного зерна, как фактора в наибольшей степени влияющего на производительность процесса. Разработанные им квазидетерминированные кинематические и термомеханические модели процесса, а также методика оптимизации режимов шлифования с учетом степени затупления инструмента позволяют методом перебора различного сочетания технологических параметров выполнения операции с со-

блюдением требований качества и производительности (экономичности) процесса назначить оптимальный режим шлифования.

Для учета временной нестационарности процесса при комплексном описании работоспособности ШК Д.В. Ардашевым [23, 24, 34] был предложен комплекс показателей работоспособности с учетом режима шлифования и времени работы ШК. В результате авторами предложен испытательный стенд [221, 237], а также методики испытаний, позволяющие получать сведения о работоспособности инструмента и представлять их в виде технологического эксплуатационного паспорта ШК (рисунок. 1.4.7) [11, 34, 344, 345]. На основе технологического паспорта инструмента возможно решать ряд технологических задач, возникающих на этапе проектирования операции шлифования [21, 22]. Указанная работа учитывает основную особенность процесса шлифования – временную нестационарность, но вместе тем обладает существенным недостатком. Недостаток заключается в том, что сведения о работоспособности инструмента получаются по результатам его стендового испытания, что существенно ограничивает диапазон технологических условий, для которых можно осуществлять проектирование операций шлифования. Кроме этого, прогнозировать работоспособность ШК на основе технологических эксплуатационных паспортов практически невозможно.

Также различные показатели работоспособности абразивных инструментов разными методами оценивались и в работах зарубежных ученых [351, 360, 409, 413, 415, 422, 432, 444, 452, 456 и др.]. Основными результатами указанных работ явилось создание аппаратного и методического оснащения испытаний ШК для измерения эксплуатационных показателей различного набора. Достаточно много работ посвящено мониторингу состояния ШК в процессах шлифования с использованием интегрированного в инструмент датчика [350, 428, 429, 457, 458 и др.]. Это делает получаемые показатели более достоверными, однако трудоемкость пуско-наладочных работ подобных испытаний достаточно велика.

В последние годы получили развитие работы, направленные на имитационное моделирование процессов шлифования и последующее создание по результатам моделирования визуальных образов ШК, обработанной поверхности, величин

объемов снятого материала, изношенной части ШК, сил шлифования и др. [365, 423, 462 и др.].

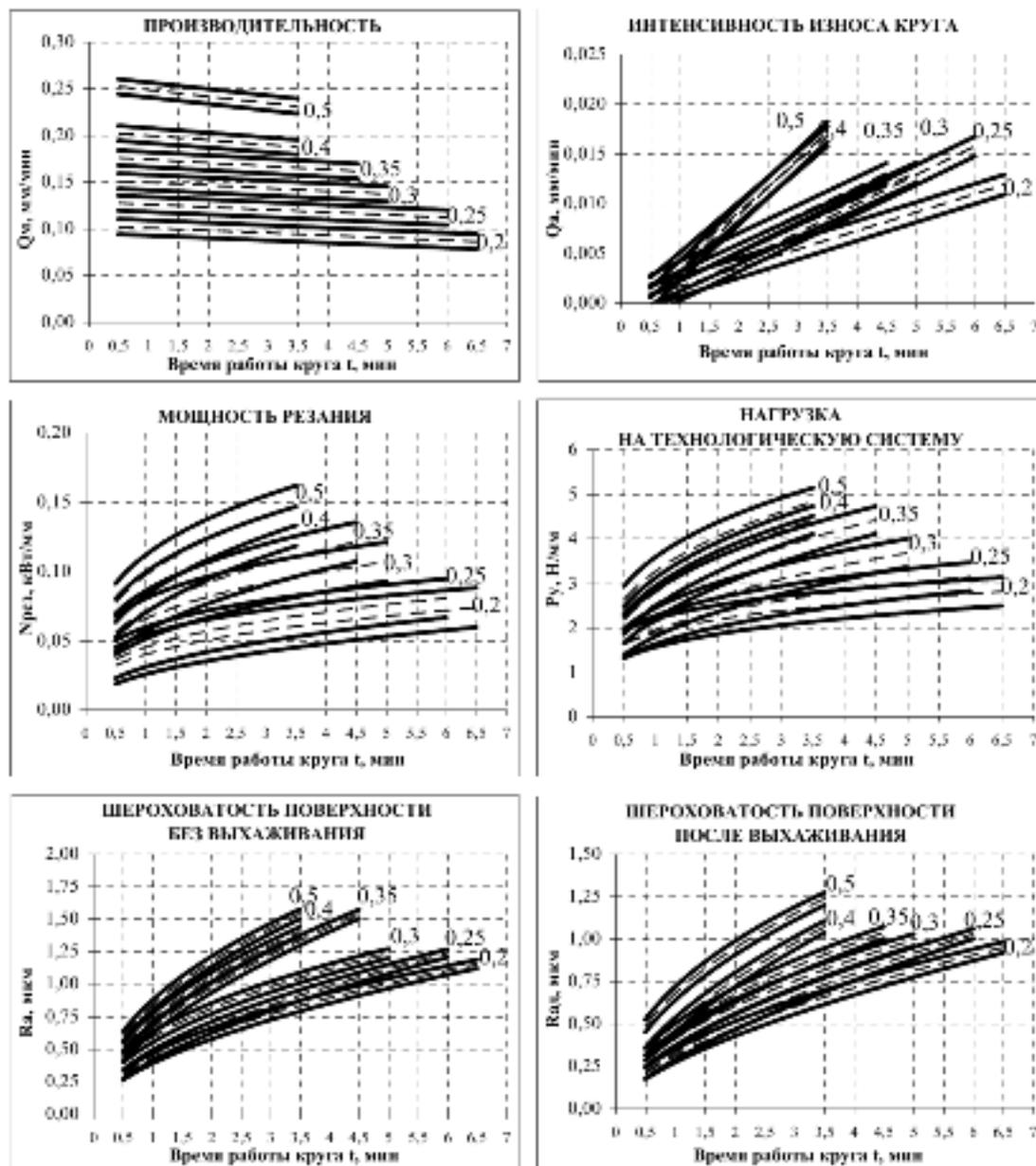


Рисунок 1.4.7 – Технологический эксплуатационный паспорт ШК [23, 24, 34]

Несмотря на достаточную развитость и точность аппаратного оснащения перечисленных методов комплексной оценки работоспособности ШК, их повсеместное применение сдерживается двумя причинами. Первая – дороговизна и трудоемкость наладки и изготовления испытательных стендов для выполнения испытаний. В этом случае подобные исследования можно рассматривать как исключительно научные, поисковые, неприемлемые для промышленного применения в чистом виде. Вторая причина – опосредованность получаемых результатов.

Это относится к исследованиям, в которых, например, звуковые колебания рассматриваются как критерии работоспособности инструмента и служат переходным звеном к реальной картине процесса. Кроме того, на основе рассмотренных методик комплексного описания работоспособности ШК затруднительно выбирать характеристику инструмента, а также прогнозировать выходные эксплуатационные показатели в широком диапазоне технологических условий операций.

Подводя итог анализу известных решений задачи комплексной оценки работоспособности ШК можно заключить следующее:

1. Существуют работы, результатом которых является комплексная оценка работоспособности инструментов. Это позволяет получить информацию об их эксплуатационных свойствах, оценить работоспособность инструмента, а также выбрать режимы обработки для конкретных условий операции шлифования.

2. Имеющиеся работы по комплексному описанию работоспособности ШК представляют величины их эксплуатационных показателей как среднеинтегральные, за определенное время работы инструмента. Это не отражает особенностей процесса шлифования – процесса с параметрами, изменяющимися во времени.

3. В ряде работ в качестве аргументов принимаются косвенные параметры, не позволяющие напрямую управлять процессом, что существенно затрудняет проектирование операции шлифования.

4. Подавляющее большинство работ подразумевает прямое испытание инструментов, что не позволяет оперативно получать сведения об их работоспособности для различных технологических условий эксплуатации.

5. Наиболее перспективным вектором развития данного направления является имитационное моделирование взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом в различных технологических условиях с учетом временной нестационарности процесса.

1.5. Существующие методики учета различных технологических условий при проектировании операций механической обработки

Анализ научно-технической литературы, посвященной проектированию операций шлифования и эксплуатации абразивных инструментов в различных

технологических условиях показал, что методики учета изменяющихся технологических условий выполнения операции шлифования можно разделить на три группы:

1. Метод поправочных коэффициентов.
2. Теоретико-эмпирические модели.
3. Имитационное моделирование процессов шлифования.

Применение системы поправочных коэффициентов нашло широкое применение в справочниках ОМН [218, 219, 258 и др.], являющихся наиболее распространенным источником для проектирования различных операций абразивной обработки. Недостатком этого метода является большое число учитываемых коэффициентов, равное числу учитываемых технологических факторов операции шлифования или их сочетаний. В связи с этим, общее количество учитываемых факторов практически не ограничено, однако увеличение их числа, а значит и количества поправочных коэффициентов в расчете, вынуждает пользователя производить достаточно большое число вычислений.

Одним из средств оптимизации такого рода справочников стало создание набора таблиц, соответствующих каждому виду шлифования, содержащих параметры выполнения операции шлифования и учитывающие те или иные измененные условия работы инструмента. Это привело к существенному увеличению объема информации, количества справочных таблиц, что также сделало такие информационные базы данных неудобными в использовании [255]. Автоматизированный выбор характеристики инструмента и назначение режима шлифования по таким информационным базам нашли свое применение, однако, в незначительных масштабах [255]. Разработанные в 2008–2012 гг. карты-номограммы для лезвийной обработки позволили в большей степени оптимизировать количество поправочных коэффициентов и существенно сократить их число [142, 155, 157, 158, 215]. Таблица-номограмма при использовании равноточных рядов позволяет компактно разместить информацию со значительно большим числом учитываемых факторов. Использование таблиц-номограмм позволяет сократить длину алгоритмической цепочки и уменьшить количество таблиц до 2,5 раз без сокращения

числа учитываемых технологических факторов. Недостатком карт-номограмм является то, что они строятся на большом количестве эмпирических сведений, определяющих взаимосвязи выходных показателей операции – шероховатости, точности обработки и др., с параметрами ее выполнения – подачей, скоростью, параметрами инструмента и др. Таким образом, для построения карт-номограмм необходим обширный систематизированный информационный материал, а методология построения карт-номограмм служит средством более компактного и концентрированного представления информации.

Теоретико-эмпирические зависимости показателей шлифования являются наиболее достоверным источником информации, однако для прогнозирования работоспособности ШК они могут применяться исключительно в условиях, адекватных тем, в которых они были получены. Кроме того, для расширения области применения эмпирических зависимостей требуется проведение дополнительных экспериментов, позволяющих получить численные значения коэффициентов, используемых в моделях. Некоторые модели показателей шлифования, предложенные отечественными и зарубежными учеными, приведены в таблице 1.5.1.

Безусловным достоинством методики прогнозирования параметров шлифования при помощи теоретико-эмпирических моделей является простота определения и табулированность параметров, входящих в расчетные уравнения. Рассмотренные модели позволяют устанавливать характер влияния различных технологических параметров операции шлифования на выходные показатели процесса.

Таблица 1.5.1 – Математические модели эксплуатационных показателей процесса шлифования

№ п/п	Группа моделей	Формула	Автор
1.	Составляющие силы шлифования	$P_y = \left(\frac{\sqrt{3,25a \sin \beta}}{\sqrt{3} \sin \beta_1} + \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot l_3 \right) \cdot \sigma_i,$ $P_z = \left(\frac{\sqrt{3,25a \cos \beta}}{\sqrt{3} \sin \beta_1} - \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot l_3 \mu \right) \cdot \sigma_i.$	С.Н. Корчак [148]
2.		$P_z = A \left(\frac{v_3}{60V_k \pm 2v_3} \right)^{1-k} \frac{t_\phi^{2-k_a}}{l_\phi^{1+k_a}} \left(\frac{D_k d_3}{D_k + d_3} \right)^{\frac{k_a}{2}} S^{1-k_a} b_{ш}^{k_a} \lambda_3$ $P_{zy} = C_{zy} t^x b^y r^z$	Е.Н. Маслов [182]
3.		$P_z = \frac{\left(0,185 U \mu \nu R_z^{1-\nu} t^\nu b \frac{v_3}{V_k} \frac{V_k}{V_k + v_3} \frac{s}{B_k} \Psi_0 \right)^{\frac{1}{1+\nu}}}{\left(2 \sqrt{\frac{a_t}{\pi}} \frac{1}{\lambda_t J} \frac{1}{b} \frac{V_k}{\sqrt{v_3}} \frac{1}{\sqrt{T_t}} \frac{1}{\sqrt{l}} \right)^{\frac{\nu}{1+\nu}}}$	Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников [106]
4.		$P_y = \sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta \frac{b_j}{\sin \beta_1} \frac{2v_3 \sqrt{\Delta t_\phi}}{60 V_k m_D} \sqrt{\frac{D_k + d_3}{D_k d_3}} \frac{W_3 W_c k_y}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_K L_K +$ $+ \frac{\sigma_i}{3} l_3 b_j \frac{W_3 W_c k_y}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_K L_K$ $P_z = \sigma_i \varepsilon_i \frac{b_j}{\sin \beta_1} \frac{2 v_3 \sqrt{\Delta t_\phi}}{60 V_k m_D} \sqrt{\frac{D_k + d_3}{D_k d_3}} \frac{W_3 W_c k_z}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_K L_K +$ $+ \mu \frac{\sigma_i}{3} l_3 b_j \frac{W_3 W_c k_z}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_K L_K$	П.П. Переверзев [239]

Продолжение таблицы 1.5.1

№ п/п	Группа моделей	Формула	Автор
5.	Составляющие силы шлифования	$P_y = \frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} \sigma_i(x) dx (\pi d_3 b_{ш} t (\varepsilon_1 \operatorname{tg} \beta / V_k) + b_{ш} \sqrt{\frac{D_k d_3 t}{n_3 (D_k + d_3)}} \eta,$	В.И. Ключко [139]
6.		$P = \frac{2 \cdot 1,23 \cdot HV \cdot b_p \cdot (N + \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p} + N \beta_0) \cdot (y^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1})}{+ \left(\frac{\tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p}}{N} + \beta_0 \right) \cdot N}$	А.А. Кузнецов [164]
7.		$F'_n = K' \frac{v_3}{V_k} t + \frac{K_1 v_3}{V_k} \left(\frac{t}{d_e} \right)^{1/2} + K_4 \left(\frac{v_3}{V_k} \right)^{a_0} d_3^{b_0} t^{c_0} C_s (t d_e)^{1/2}$ $F'_t = K' \frac{v_3}{V_k} t + \left(K_2 + \frac{K_3 v_3}{d_e V_k} \right) (d_e t)^{1/2} + K_5 \left(\frac{v_3}{V_k} \right)^{a_0} d_3^{b_0} t^{c_0} C_s (t d_e)^{1/2}$	U.S. Patnaik Durgumahanti, S. Vijayender, P. Venkateswara Rao [361]
8.		$F_t = \left(K_1 + K_2 \ln \frac{V_k^{1,5}}{t^{0,25} v_3} \right) \frac{V_k t}{v_3} b_{ш} + b_{ш} A_{ш} \left(\alpha + \frac{4 \beta p_0 v_3}{d_e V_k} \right) (d_e t)^{1/2}$ $F_n = \left(K_3 + K_4 \ln \frac{V_k^{1,5}}{t^{0,25} V_w} \right) \frac{v_p t}{V_k} b_{ш} + \frac{4 b_{ш} A_{ш} p_0 v_3}{V_k} \left(\frac{t}{d_e} \right)^{1/2}$	J. Tang, J. Du, Y. Chen [453]
9.	Шероховатость шлифованной поверхности	$Rz = 10^3 \xi \left(\frac{N B_k - 1}{S} \right) \left[t - \frac{P_y}{j_{спид}} - \frac{P_y}{S} \frac{[E_2 (1 - \mu_1^2) + E_1 (1 + \mu_2^2)]}{\pi E_1 E_2} \right] \times$ $\times \ln \frac{4 \pi E_1 E_2 \left(\frac{D_k + d_3}{2} \right) + l^2 \left(1 + \frac{v_3}{60 V_k} \right)^2}{\frac{P_y}{S} [E_1 (1 - \mu_2^2) + E_2 (1 - \mu_1^2)]} + \frac{\left(\frac{1 - 2 \tau_0}{\sigma_r} \right) \left[2S + 0,5r \left(1 - \frac{2 \tau_0}{\sigma_r} \right) \right]}{32}$	А.Г. Суслов [292]

Окончание таблицы 1.5.1

№ п/п	Группа моделей	Формула	Автор
10.	Шероховатость шлифованной поверхности	$Ra(T) = (Ra_{нач} - Ra_{ст})e^{-\lambda T} + Ra_{ст}e^{\delta T}$	С.Н. Филимонов [303]
11.		$Ra = \frac{C_{Ra} v_3^p t^z s^q k_1 k_2 k_3}{V_k^w d^\mu H^n}$	Е.Н. Маслов [182]
12.		$H_{СК}^H = 21,23 \frac{v_3^{0,35} s^{0,18} t^{0,2}}{V_k^{1,11} N^{0,15}}$ $H_{СК}^3 = 11,35 \frac{v_3^{0,47} s^{0,24} t^{0,22}}{V_k^{1,05} N^{0,13}}$	Б.Б. Троицкий [296]
13.		$Ra = 0,86t^{0,1843} S^{0,5253} M^{-0,2866} C_s^{-0,2444}$	А. V. Gopal, Р. V. Rao [366]
14.	Температура в зоне шлифования	$U(x_m, 0) = \mu \frac{2}{\lambda_T \cdot l_3} \sqrt{\frac{\chi \cdot L_k}{\pi(V_k + v_3)}} \sum_{k=1}^m q_i [U(x_{m-k})] \left(\sqrt{k_T} - \sqrt{k_T - \frac{l_3}{l_{p3}}} \right)$	В.И. Клочко [139]
15.	Мощность шлифования	$N = C_N \cdot v_3^r \cdot S_{рад}^y \cdot d_3^q \cdot b_{ш}^z$	В.Ф. Безъязычный, В.П. Покровский, М.А. Рождественский [288]
16.	Скорость съема металла	$Q_M = \frac{P_y \cdot V_k}{\sigma_i \cdot K_1} - K_2 \cdot F_2 \cdot V_k$	С.Н. Корчак, П.П. Переверзев, Г.И. Буторин, А.А. Кошин [147].

Теоретико-эмпирическим моделированием показателей шлифования также занимались Е.Г. Бердичевский, А.П. Глушенков [38], В.К. Габданк, С.Е. Гиршовичус, З.И. Кремень, В.И. Островский [68], Л.В. Копылов [143], Т. Мацуо, Н. Накасако [186], А.А. Кошин, С.А. Фадюшин, Т.Я. Лончинская, Л.В. Пушкарева [214], А.Н. Резников [259], Г.И. Саютин и В.А. Носенко [273], Я.И. Солер, А.Б. Стрелков, Е.О. Репей [286], Н.Ф. Торопов [295], А.К. Цокур, С.М. Песочин, А.И. Драевский [316], K. Ding, Y. Fu, H. Su, X. Gong, K. Wu [359], O. Horiuchi, T. Samura, T. Uno, T. Itazu, N. Ito, T. Shibata, M. Masuda, [372], X. Lang, Y. He, J. Tang, H. Chen [420], R. Rudrapati, P.K. Pal, A. Bandyopadhyay [438, 439], K. Zhang, Y. Yu, W. Wang, H. Li [464] и др.

К третьей группе методик прогнозирования относятся исследования, построенные на имитационном моделировании процесса. При этом учитываются параметры обрабатываемой заготовки, инструмента, технологические условия выполнения операции и др. Так, D.L. Butler предложил трехмерную визуализацию абразивного инструмента, по результатам которой ориентировочно определить уровень сил резания и параметров обработанной поверхности [353]. Стойкостная имитационная модель предложена в работе X. Chen, D.R Allanson и W.B Rowe [354]. В исследовании J.A. Badger and A. Torrance [346] предложена методика прогнозирования величины силы шлифования, в зависимости от микрорельефа рабочей поверхности ШК. В работе W. B. Rowe, Y. Li, X. Chen, B. Mills предложен многокритериальный подход к моделированию процессов абразивной обработки, что позволило авторам разработать методы назначения режимов шлифования для конкретных операций [436]. Моделирование энергетических и силовых параметров для конкретных условий обработки предложено в работе H.K. Tönshoff, J. Peters, I. Inasaki, T. Paul [455].

Для прогнозирования величины шероховатости поверхностей зубчатых колес после шлифования тарельчатыми кругами разработана методика компьютерной симуляции, которая показала расхождение с экспериментальными данными в пределах 5–7 % [369]. Многофакторная имитация процесса шлифования, позволяющая с помощью виртуального пространства описывать шероховатость обра-

ботанной поверхности, была предложена Y. Gong, B. Wang, W.S. Wang, T.A. Nguyen, D.L. Butler [365, 431]. Кроме того, предложена оценка рабочей поверхности инструмента трехмерными средствами, в результате которой возможно получить прогноз по величинам составляющих силы шлифования, скорости съема материала и др. [353]. Для обработки сверхтвердых керамических материалов предлагается цифровая методика, представляющая ШК дискретными элементами и устанавливающая количественную взаимосвязь между интенсивностью съема материала и силами шлифования [445]. Также оценивалось распределение тепловых потоков [363], термонапряжение обрабатываемой заготовки при круглом шлифовании [411], шероховатость поверхности после шлифования [443, 425].

Комплексное имитационное моделирование абразивного инструмента, отдельно взятого абразивного зерна и его взаимодействия с заготовкой было выполнено в исследованиях T.T. Opoz, Ch. Xun [355], X. Li [423]. Результат – методики имитационного моделирования процесса, позволяющие изучить процесс шлифования при изменении технологических условий его выполнения.

Для исследования процессов формообразования обработанной поверхности и ее шероховатости к настоящему времени разработаны имитационные модели А.М. Козловым [141], A. Darafon, A. Warkentin и R. Bauer [357], J. Jianga, P. Gea, W. Bia, L. Zhanga, D. Wanga, Y. Zhanga [412], E. Salisbury, K. Vinod Domala, K. Moon, M. Miller и J. Sutherland [440], X. Zhou и F. Xi [465]. Указанные модели позволяют построить рельеф обработанной поверхности и для него рассчитать параметры шероховатости. А.А. Дьяконовым и Л.В. Шипулиным построена комплексная имитационная модель плоского шлифования периферией круга, объединяющая в себе моделирование механического, теплофизического и силового взаимодействия инструмента и заготовки [102]. В Самарском государственном техническом университете выполнен ряд работ, направленных на моделирование контактного взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой [309]. Основным результатом работы явилось исследование влияния геометрических параметров абразивного зерна и глубины резания на величину остаточных напряжений в поверхностном слое заготовки.

Имитационное моделирование контактного взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой детали также выполнялось А.Р. Гисметулиным и О.М. Сидоренко [71], А.М. Хановым, Л.Д. Сиротенко, Л.П. Шингель, Е.В. Матыгуллиной, Е.О. Трофимовым [307], Г.Л. Барановым [348], К. Мао, Y. Sun, A. Bloyce, H. Dong [426], H.L. Xing, P. Mora, A. Makinouchi [461].

В диссертационной работе Хуекун Ли шлифование рассматривается как интегрированный процесс микроявлений [423]. Для установления количественных взаимосвязей параметров процесса автором разработана модель виртуального ШК на основе анализа технологического процесса изготовления инструмента. В дальнейшем выполняется имитационное моделирование процесса взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой методами микрорезания. На выходе получают силовые характеристики процесса и параметры качества обработанной поверхности. Полученные автором результаты могут использоваться для оценки выходных параметров процесса шлифования, а также для разработки рецептов изготовления ШК, обладающих определенными режущими свойствами.

Основным достоинством методик прогнозирования, функционирующих на основе имитационного моделирования, является то, что они позволяют без изготовления специальных стендов и опытных образцов, без создания экспериментальных методик и комплексов измерительной аппаратуры, используя современные компьютерные средства, имитировать процесс взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом. При этом с минимальными затратами времени позволяют получать достаточно обширные сведения о результатах выполнения операции шлифования в тех или иных технологических условиях.

Однако вместе с этим повсеместное применение рассмотренных имитационных методов в значительной степени сдерживается существенной трудоемкостью подготовки исходных данных для выполнения прогноза, а также требованием наличия адекватных имитационных моделей, позволяющих получить достоверные результаты взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой детали. В частности, в научной литературе не найдено сведений о столь важной величине, как размер площадки затупления, возникшей на абразивном зерне по

прошествии определенного времени его работы. Подавляющее большинство исследований в области абразивной обработки указывают на преобладающее влияние износа абразивных зерен на выходные показатели работы инструмента. В связи с этим учет и прогнозирование изменения величины затупления абразивного инструмента в процессе его работы при выполнении имитационного моделирования процессов абразивной обработки представляется довольно важным.

1.6. Износ абразивных инструментов в процессах шлифования

В научной литературе по теории резания материалов выделяются несколько механизмов износа режущей кромки инструмента: абразивный или абразивно-химический, адгезионный и физико-химический и др. [90, 112 и др.]. При этом процесс изнашивания рабочей поверхности абразивного инструмента представляется сложным механо-химическим процессом [182, 209 и др.], интенсивность которого зависит от условий выполняемой операции: характеристики инструмента, режимов резания, химического состава обрабатываемого материала и др. В процессе износа протекают явления хрупкого скалывания и пластического деформирования, нагрева и окисления контактирующих поверхностей, взаимодействия с окружающей средой и СОТС и др. [182].

Степень износа абразивных зерен ШК является фактором, от которого в значительной мере зависят выходные показатели процесса шлифования: сила резания, температура в зоне шлифования, шероховатость обработанной поверхности и др. Из опыта шлифования известно, что с увеличением степени затупления абразивных зерен ШК, снижением их режущей способности, снижается производительность процесса, возрастает вероятность прижогов, появления на обработанной поверхности макронеровностей: огранки, волнистости и др. В связи с этим, подавляющее большинство математических моделей, представленных в настоящее время в научно-технической литературе, позиционируют величину износа абразивных зерен ШК как параметр, в наибольшей степени оказывающий влияние на выходные показатели обработки.

В таблице 1.6.1. приведены некоторые математические модели, описывающие различные показатели процесса шлифования, учитывающие износ ШК или единичного абразивного зерна различными параметрами.

Что касается численных значений учитываемых параметров износа, то в приведенных моделях для различных условий они принимаются постоянными. Например, по данным А.А. Маталина размер площадки затупления абразивного зерна $l_3=0,15$ мм [184], в работе С.Н. Корчака – $l_3=0,1$ мм [148]. Также приводятся средние значения для целого ряда технологических условий работы инструмента [292] или предложены различного рода модели, позволяющие определить какой-либо параметр износа для конкретных технологических условий (таблица 1.6.2).

Приведенные в таблице 1.6.2. модели для определения различных параметров износа единичных абразивных зерен и всего ШК в большинстве своем носят эмпирический характер, а если и обладают аналитическими свойствами, то опосредованно, не учитывая реальные условия работы абразивного зерна: характеристики абразивного и обрабатываемого материала, режимы шлифования и др. В ряде моделей присутствуют укрупненные обобщающие коэффициенты, качественно учитывающие сразу несколько технологических условий работы инструмента, что существенно загроубляет результаты расчета.

В научно-технической литературе достаточно широко и полно описан износ абразивных зерен при шлифовании. Это работы С.Н. Корчака, А.А. Кошина, В.И. Ключко, П.П. Переверзева [145], Б.И. Костецкого [151], М.И. Клушина [140], Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучавы [175, 176], Е.Н. Маслова [182], О.И. Медведевой, А.С. Янюшкина, В.Ю. Попова [188], Л.Л. Мишнаевского [189], В.А. Носенко, М.В. Даниленко, Е.В. Федотова, С.В. Носенко [205–209], Г.А. Самсонова, А.А. Адамовского, А.И. Безыкорнова, В.В. Уварова [269], В.С. Пташникова, И.Я. Ривлина, Л.В. Денисовой, Е.Д. Федоровой [248], Ж.В. Симсиве, А.В. Кутышкина, Д.Ц. Симсиве [281], Л.Н. Филимонова [304], S. Yossifon, C. Rubenstein [463], S.J. Deutsch [358], R. Neugebauer, K.-U. Hess, S. Gleich, S. Pop [430], M.P. Hitchiner, J. Wilks [371], C. Bao, Y. Song, S. Hou, X. Yang, J. Yang, W. Yao, [347], Z. Shi [446] и др.

Таблица 1.6.1 – Математические модели эксплуатационных показателей процесса шлифования, учитывающие износ абразивного зерна

№ п/п	Группа моделей	Формула	Параметр износа	Автор(ы)
1.	Составляющие силы шлифования	$P_y = \left(\frac{\sqrt{3,25a \sin \beta}}{\sqrt{3} \sin \beta_1} + \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot l_3 \right) \cdot \sigma_i,$ $P_z = \left(\frac{\sqrt{3,25a \cos \beta}}{\sqrt{3} \sin \beta_1} - \frac{0,5}{\sqrt{3}} \cdot l_3 \mu \right) \cdot \sigma_i.$	l_3 – размер площадки затупления	С.Н. Корчак [148]
2.		$P_y = \sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta \frac{b_j}{\sin \beta_1} \frac{2 v_3 \sqrt{\Delta t_{\phi_3}}}{60 V_k m_D} \sqrt{\frac{D_k + d_3}{D_k d_3}} \frac{W_3 W_c k_y}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_k L_k +$ $+ \frac{\sigma_i}{3} l_3 b_j \frac{W_3 W_c k_y}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_k L_k$ $P_z = \sigma_i \varepsilon_i \frac{b_j}{\sin \beta_1} \frac{2 v_3 \sqrt{\Delta t_{\phi}}}{60 V_k m_D} \sqrt{\frac{D_k + d_3}{D_k d_3}} \frac{W_3 W_c k_z}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_k L_k +$ $+ \mu \frac{\sigma_i}{3} l_3 b_j \frac{W_3 W_c k_z}{(1 - W_3 - W_c) d_z^2} B_k L_k$		П.П. Переверзев [239]
3.		$\begin{cases} P_i = f(l_3; s_i; U_c); \\ P_{кр} = \sum_{i=1}^n P_i. \end{cases}$		А.А. Дьяконов [362]
4.		$P_y = \frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} \sigma_i(x) dx (\pi d_3 b_{ш} t (\varepsilon_i \operatorname{tg} \beta / V_k) + b_{ш} \sqrt{\frac{D_k d_3 t}{n_3 (D_k + d_3)}} \eta,$		η – степень затупления круга

Продолжение таблицы 1.6.1

№ п/п	Группа моделей	Формула	Параметр износа	Автор(ы)
5.	Составляющие силы шлифования	$F_t = \left(K_1 + K_2 \ln \frac{V_k^{1,5}}{t^{0,25} V_3} \right) \frac{V_k t}{V_3} b_{ш} + b_{ш} A_{ш} \left(\alpha + \frac{4\beta p_o v_3}{d_e V_k} \right) (d_e t)^{1/2}$ $F_n = \left(K_3 + K_4 \ln \frac{V_k^{1,5}}{t^{0,25} V_w} \right) \frac{v_p t}{V_k} b_{ш} + \frac{4b_{ш} A_{ш} p_o v_3}{V_k} \left(\frac{t}{d_e} \right)^{1/2}$	А – степень затупления абразивного круга	J. Tang, J. Du, Y. Chen [453]
6.		$P = \frac{2 \cdot 1,23 \cdot HV \cdot b_p \cdot (N + \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p} + N\beta_0) \cdot (y^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1})}{N} + \left(\frac{\tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p}}{N} + \beta_0 \right) \cdot N$	h _{изн} – величина радиального износа абразивного зерна	А.А. Кузнецов [164]
7.		$F'_n = K' \frac{v_3}{V_k} t + \frac{K_1 v_3}{V_k} \left(\frac{t}{d_e} \right)^{1/2} + K_4 \left(\frac{v_3}{V_k} \right)^{a_0} d_3^{b_0} t^{c_0} C_s (td_e)^{1/2}$ $F'_t = K' \frac{v_3}{V_k} t + \left(K_2 + \frac{K_3 v_3}{d_e V_k} \right) (d_e t)^{1/2} + K_5 \left(\frac{v_3}{V_k} \right)^{a_0} d_3^{b_0} t^{c_0} C_s (td_e)^{1/2}$	d ₃ – диаметральный размер зерна	U.S. Patnaik Durgumahanti, S. Vijayender, P. Venkateswara Rao [361]
8.		$F_{en} = C \cdot H \left(\frac{l}{l_s} h_{max} \right)^2 \tan^2 \left(\frac{\Theta}{2} \right) + S_e \eta H$ $F_{en} = C \cdot H \left(\frac{l}{l_s} h_{max} \right)^2 \tan^3 \left(\frac{\Theta}{2} \right) + \mu S_e \eta H$	С – коэффициент, учитывающий особенности геометрии зерна	S. Lin, Y. Shuming, Y. Lin, Zh. Pu, W. Pengfei, J. Zhuangde [424]

№ п/п	Группа моделей	Формула	Параметр износа	Автор(ы)
9.	Шероховатость шлифованной поверхности	$Rz = 10^3 \xi^{(N \frac{B_k}{S} - 1)} \left(t - \frac{P_y}{j_{спид}} \frac{\frac{P_y}{S} [E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 + \mu_2^2)]}{\pi E_1 E_2} \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{4 \pi E_1 E_2 \left(\frac{D_k}{2} + \frac{d_3}{2} \right)}{\frac{P_y}{S} [E_1(1 - \mu_2^2) + E_2(1 - \mu_1^2)]} + \frac{l^2 \left(1 + \frac{v_3}{60 V_k} \right)^2}{4 D_k} + \right. \\ \left. + \frac{\left(\frac{1 - 2\tau_0}{\sigma_T} \right) \left[2S + 0,5r \left(1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) \right]}{32} \right)$	r – радиус округления режущей кромки зерна	А.Г. Суслов [292]
10.		$z(x, y) = \frac{(y - y_0)^2}{2b} + \sqrt{\left(\frac{D}{2} - t \right)^2 - (x - x_0)^2} + \frac{D}{2} + \frac{b}{2} - t$ $x \in \left(x_0 - \frac{1}{2}; x_0 + \frac{1}{2} \right), y \in \left(y_0 - \frac{c}{2}; y_0 + \frac{c}{2} \right)$	Постоянный коэффициент, влияющий на форму зерна	Л.В. Шипулин [447]
11.		$Ra(T) = (Ra_{нач} - Ra_{ст}) e^{-\lambda T} + Ra_{ст} e^{\delta T}$	δ – показатель, учитывающий затупление и засаливание круга	С.Н. Филимонов [303]
12.	Температура в зоне шлифования	$U(x_m, 0) = \mu \frac{2}{\lambda_T \cdot l_3} \sqrt{\frac{\chi \cdot L_k}{\pi(V_k + v_3)}} \sum_{k=1}^m q_i [U(x_{m-k})] \left(\sqrt{k_T} - \sqrt{k_T - \frac{l_3}{l_{pz}}} \right)$	l ₃ – размер площадки затупления	В.И. Клочко [139]

Таблица 1.6.2 – Математические модели для определения параметров износа абразивного инструмента

Параметр	Формула	Автор	Год
Величина износа, коэффициент остроты зерен	$W_{a.k.} = C_W v_d^{1,7} s_{oc}^{1,7} t^{1,6}$ $k = \frac{t}{\rho_z}$	Е.Н. Маслов [182, 183]	1962, 1974
Объем диффузионного слоя	$W_{a.k.} = 0,16 \sqrt{l_3 D_k V_k} \cdot L_k \frac{T}{D_k}$	Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава [175, 304, 311]	1965, 1969, 1973
Величина износа	$W_{a.k.} = C_W \cdot v_{спад} \cdot T$	О.И. Серховец, А.В. Фесенко, А.С. Козырь [278]	1978
	$W_{a.k.} = C_W \cdot T_{gi}^b \cdot z^\gamma \cdot V_k$	А.Д. Калинин, Б.Н. Байор [128]	1978
Коэффициент интенсивности износа	$K = \frac{W_{a.k.}}{t}$	С.Н. Корчак, А.А. Кошин, В.И. Клочко, П.П. Переверзев [145]	1982
Величина износа	$W_{a.k.} = \frac{\pi D_k h_k B}{T}$	Н.С. Алексеев [5]	2004
	$W_{a.k.} = a \Delta K^b$	В.А. Носенко, М.В. Даниленко [207, 206]	2004
Вероятность вида износа	$P_B + P_C + P_I = 1$		2009
Коэффициент затупления зерен	$k = \frac{\pi l_{3,i} \cdot z \cdot 10^2}{4}$	Е.П. Калинин [130]	2009
Величина площадки износа	$l_3 = \frac{\pi d_z^2}{9}$	К. Salonitis [442]	2015
Величина износа	$W_{a.k.} = \frac{\tau_s \cdot z \cdot C_W \cdot K_z \cdot \sqrt{2(\rho_z + c_1 \cdot t^k)} \cdot y^{5/2} \Phi_z(\psi)(c_1 + c_2)}{\int_a^b \frac{\cos^2(n, Y)}{V_{1,2}} ds}$	А.В. Славин [284]	2016

Все эти работы содержат исследования, направленные на изучение того или иного механизма износа абразивного зерна в различных технологических условиях операций абразивной обработки. Тем не менее, практически во всех работах указывается на то, что ни один из механизмов износа зерен круга – абразивный, усталостный, диффузионный, химический, адгезионный и др. – не действует обособлено. Различные механизмы износа взаимосвязаны, оказывают друг на друга сильное влияние и в процессе работы абразивного зерна проявляются совместно: абразивно-химический, адгезионно-усталостный, химико-адгезионный и т.д. При этом, например, Л.Н. Филимонов указывает, что «наиболее существенными для шлифования свойствами абразивных материалов являются хрупкая прочность, износостойкость и химическая инертность по отношению к обрабатываемому материалу» [304]. Следовательно, одним из основных видов износа абразивных зе-

рен при шлифовании является механический, при этом он ставится в прямую зависимость от прочностных свойств обрабатываемого материала. Однако механизм образования площадки затупления в результате действия данного вида износа и удаления элементарного объема абразива с рабочей поверхности зерна до сих пор не имеет внятного толкования. Некоторые исследователи объясняют эти процессы срезанием части абразивного зерна сверхтвердыми включениями в обрабатываемом материале, либо разупрочнением режущих кромок абразивного зерна вследствие термоударов и существенным их износом и т.д.

Известно, что при постоянном (квазипериодическом) контакте абразивного зерна с обрабатываемым материалом происходит разрушение абразивного зерна, сопровождающееся обновлением контактирующих с заготовкой поверхностей зерна и появлением новых микроплощадок контакта, образующих с поверхностью заготовки элементарные пары трения. Вновь образовавшиеся на абразивном зерне микроповерхности характеризуются крайне неравновесным состоянием: вступая в контактное взаимодействие с аналогичными поверхностями на обрабатываемой заготовке они, по истечении определенного периода времени, удаляются.

В таблице 1.6.3 приведены основные механизмы износа абразивного зерна при шлифовании и результаты их действия.

Таблица 1.6.3 – Основные виды износа абразивного зерна

Вид	Механизм	Результат
Механический	Истирание микрообъемов абразива с поверхности абразивного зерна, усталость абразивного материала	Образование площадки затупления на абразивном зерне
Физико-химический	Реактивная и гетеродиффузия между абразивным и обрабатываемым материалом	Удаление частиц абразивного материала, образование субмикрпрофиля площадки затупления
Адгезионно-химический	Вырывание небольших частиц абразива в результате адгезионного схватывания с обрабатываемым материалом	Образование новых режущих кромок на абразивном зерне, формирование профиля площадки затупления
Поверхностный	Скалывание крупных частиц абразивного зерна	Образование новых режущих кромок на зерне
Объемный	Вырывание целого зерна из рабочей поверхности круга	Обновление рабочей поверхности круга (режим самозатачивания)

В начальный период работы ШК рельеф его рабочей поверхности сформирован правкой: на рабочей поверхности инструмента находятся зерна, ранее скрытые в глубине ШК, а также часть зерен, выступавших на поверхности ШК перед правкой, которые разрушены правящим инструментом [460]. При соприкосновении острого абразивного зерна с заготовкой на нем начинает образовываться площадка затупления: ШК вступает в период приработки. Продолжительность периода приработки зависит от большого числа факторов: структуры и твердости ШК, режимов шлифования, марки обрабатываемого материала и т.д. Тем не менее, вне зависимости от перечисленных факторов этот период присутствует при эксплуатации любого ШК в любых технологических условиях. На протяжении начального периода абразивные зерна ШК, вступая во взаимодействие с обрабатываемым материалом, подвергаются как механическому, так и физико-химическому взаимодействию. В результате на них происходит образование площадки затупления. По достижении на работающих зернах площадок затупления определенной величины начинается основной период работы инструмента.

Основной период работы ШК – самый длительный. На протяжении него работающие абразивные зерна ШК совершают работу по удалению основной части припуска, обеспечивают выполнение требований по качеству обработанной поверхности, точности, неприжоговости и др. При этом также происходит износ рабочей поверхности абразивных зерен ШК и увеличение на них площадок затупления.

На завершающем этапе работы ШК на абразивных зернах появляются площадки затупления, размеры которых соответствуют критическим. Это приводит к существенному возрастанию силы шлифования, действующей на одно зерно и, как следствие, вырыванию зерна из связки в случае работы круга в режиме самозатачивания или необходимости правки рабочей поверхности инструмента, если круг работает в режиме затупления.

Следует отметить, что некоторые авторы механический и физико-химический износ абразивного зерна в процессах шлифования признают основными, действующими при шлифовании подавляющего количества конструкцион-

ных легированных сталей и сплавов [367]. S.K. Bhattacharyya и V.L. Moffatt указывают на то, что при формировании площадки износа на каждом абразивном зерне сначала действует износ истиранием, а впоследствии поверхностный износ, при котором с поверхности зерна сходят элементарные объемы абразива [349].

Интенсивность физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов особенно возрастает при высоких контактных температурах. Так, Г.И. Саютин и В.А. Носенко отмечают, что в зависимости от сочетания «абразивный материал–обрабатываемый материал–СОЖ» при шлифовании доминирующими механизмами износа могут выступать как механические (для сочетания «электрокорунд–сталь»), так и физико-химические явления (при обработке карбидом кремния стальных заготовок) [273]. При этом авторы указывают, что при выборе характеристики ШК и режимов шлифования необходимо исходить из того, что управлять механическим износом легче, чем физико-химическим, следовательно, необходимо подбирать такие сочетания «абразивный материал – обрабатываемый материал», при которых будет превалировать механический износ [273]. Адгезионный износ в большей мере относится к обработке жаропрочных, вязких сплавов. Поверхностный и объемный износ, вследствие которого происходит скалывание вершин абразивных зерен и обновление рабочей поверхности инструмента, доминируют при обработке керамики и др. высокопрочных материалов, а также при тяжелых работах, например, при обдирочном шлифовании.

В многономенклатурном производстве затруднительно применять существующие рекомендации по выбору характеристики ШК и режимов шлифования, составленные, в том числе, с учетом особенностей изнашивания абразивных зерен. Наиболее часто встречающейся ситуацией является ситуация, когда обработку различных материалов осуществляют ШК конкретной характеристики. Следовательно, при исследовании процесса износа абразивных зерен существует необходимость учета различных механизмов его протекания при рассмотрении их совместного действия, с различной степенью интенсивности. В связи с тем, что в настоящее время в литературе о шлифовании материалов не содержится зависимостей, позволяющих рассчитать объем абразива, изношенного в результате дей-

ствия того или иного вида износа при различных технологических условиях, то для прогнозирования работоспособности абразивных инструментов в изменяющихся технологических условиях необходимо разработать комплексную модель износа абразивного зерна, позволяющую определить в любой момент времени работы инструмента величину его износа, и учитывающая при этом различные механизмы его протекания.

1.6.1. Кинетическая трактовка механического износа абразивного зерна

Традиционный подход к прочности твердого тела описывается теориями предельных состояний. Это теории А.А. Гриффита, Ш.О. Кулона, Д. Максвелла, Э. Мариотта, К.О. Мора, Л.А. Навье, Е.О. Орована, Б. Сен-Венана, Д. Хуберта, Н.Н. Давиденкова и Я.Б. Фридмана и др. Указанные теории оценивают прочность тела при помощи различных показателей, определяемых из испытаний образцов в конкретных условиях. В соответствии с ними принято считать, что разрушение тела происходит после того, как напряжение достигает теоретического предела. В связи с этим, существующие теории прочности твердых тел представляют собой теории предельных состояний, причем возможные состояния тела характеризуются как «тело целое» или «тело разрушено». Следовательно, такие теории прочности не позволяют рассмотреть процесс разрушения во времени, поскольку в качестве критерия сплошности материала предлагают значения различных параметров.

С.Н. Журкова, В.Р. Регеля и др. заинтересовал факт, показывающий, что напряжение не является единственным аргументом, определяющим прочность тела [110, 257]. Оказалось, что при определенном напряжении прочность нагружаемого тела зависит от длительности его напряженного состояния. Образец, разорванный за короткое время, обладает более высокой прочностью, чем образец, разрушенный в течение длительного времени. Такое влияние времени нагружения на прочность тела тяжело сопоставляется с представлениями, описанными в вышеупомянутых традиционных теориях прочности. Если на самом деле разрушение происходит мгновенно, при созданном извне критическом напряжении, то какое влияние на прочность оказывает время? И наоборот, если процесс разрушения

— процесс протяженный во времени, то теряет всякий смысл понятие «предельное напряжение» (предел прочности тела) [110, 257].

Академиком С.Н. Журковым и его учениками была проведена серия экспериментов, которые заключались в одноосном растяжении образца и фиксации времени τ от начала действия нагрузки, до момента разрушения тела. Испытания проводились при комнатной температуре и разной величине действующих нормальных напряжений σ . Было установлено, что между временем τ и величиной действующих в теле напряжений σ существует однозначная зависимость: с уменьшением напряжения долговечность тела резко возрастает [110, 257].

В итоге, С.Н. Журковым и др. [110, 257] была получена зависимость для времени τ , названному «долговечностью», от напряжения σ и температуры испытания T_t в виде

$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT_t} \right)} \quad (1.6.1)$$

Показатель степени экспоненты $\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT_t}$, называемый фактором Больцмана, используется при описании таких кинетических процессов, как испарение, диффузия, химические реакции и т.д. То, что в основе разрушения твердых тел лежит тот же параметр, который определяет перечисленные процессы, позволяет понять то общее, что лежит в основе разрушения твердого тела и указанных физико-химических процессов. Общим здесь является неравномерность распределения тепловой энергии между атомами тела, порождаемая хаотичностью их теплового движения [110, 257].

Опираясь на характерный вид формулы для долговечности твердых тел под нагрузкой, процессу разрушения предписывается термоактивационная (термофлуктуационная) природа. Кинетика развития процесса разрушения определяется вероятностью преодоления «энергетического барьера», т.е. перехода системы в состояние с повышенной потенциальной энергией. Величина U_0 , стоящая в числителе показателя больцмановского фактора, и является тем «барьером», который должен быть преодолен атомами для развития процесса разрушения. Энергия, ко-

торой должны обладать для этого атомы, называется «энергией активации процесса разрушения» [257].

Детализируя характер теплового движения атомов можно заключить следующее. При заданной температуре тела T_t каждый атом совершает сравнительно малые колебания. Средняя энергия E_{cp} этих колебаний на одну степень свободы атома равна kT_t . Период этих колебаний – τ_0 – близок по величине к 10^{-13} с и сохраняется с точностью примерно до одного порядка одинаковым для всех твердых тел, т.е. параметр τ_0 представляет собой долговечность тела под нагрузкой для флуктуаций, равных по величине барьеру напряженных связей [257].

В итоге, главным действующим фактором при разрушении тела оказывается не внешняя сила, а тепловое движение атомов, порождающее энергетические флуктуации. Именно флуктуации разрывают межатомные связи, что и ведет к разрушению тела. Внешняя сила выступает здесь в качестве своеобразного «вентиля», открывающего флуктуациям возможность разрывать связи и запирающего возможность такой рекомбинации. То есть внешняя нагрузка обеспечивает направленность разрывного действия флуктуаций, без чего не может начаться развиваться разрушение тела. При таком представлении о природе процесса разрушения можно заключить, что значительная, а иногда и основная доля работы по разрушению выполняется не внешней силой (как полагали ранее), а за счет запаса тепловой энергии тела. Работа внешней силы может составлять здесь малую долю. Все это позволяет рассмотреть механическую прочность тела как свойство, которое в своей основе имеет не «чисто механическую» природу, обусловленную только силовым взаимодействием атомов, а «кинетическую» природу, связанную с тепловым движением атомов. Это дает основание говорить о кинетической природе прочности твердых тел [257].

Таким образом, в соответствии с кинетической теорией разрушения твердых тел, разрушение – это непрерывно развивающийся в течение некоторого времени процесс, начинающийся сразу же после приложения к телу нагрузки. На дне потенциальной ямы атомы твердого тела совершают малые колебания с периодом τ_a , но вследствие хаотического их движения амплитуда этих колебаний иногда

значительно возрастает, атом совершает флуктуацию (рисунок 1.6.1, а), возникающую с периодом $\tau_{\text{фл}}$. Под действием внешней нагрузки F , являющейся некоторым активатором сил, разрушающих тело, энергетический барьер, который должен преодолеть атом резко снижается. В результате происходит вначале напряжение единичной атомной связи, а затем и ее разрыв. Начинаются разрывы межатомных связей, происходит их накопление и потеря телом сплошности – разрушение (рисунок 1.6.1, б).

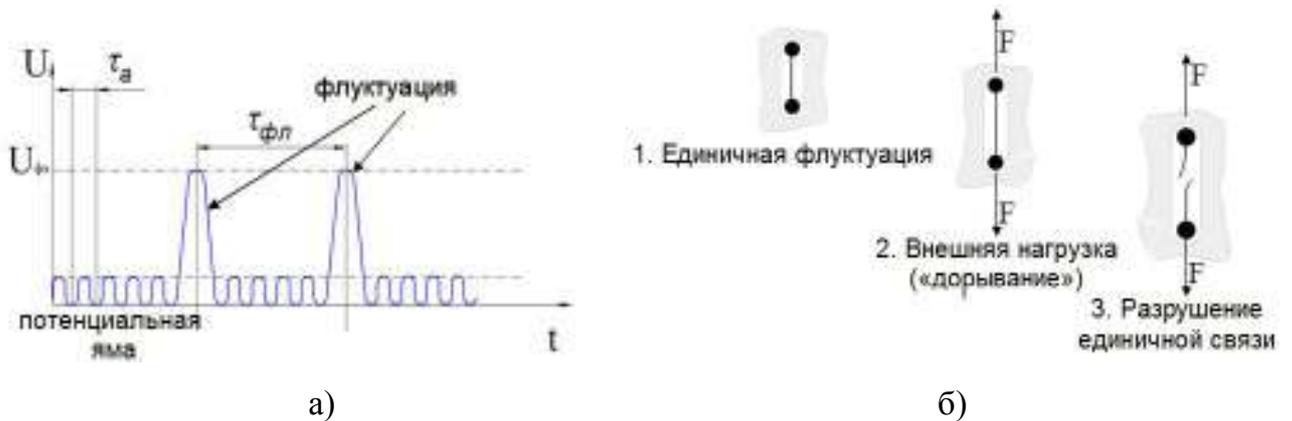


Рисунок 1.6.1 – Механизм разрушения твердых тел в соответствии с кинетической теорией: а) тепловые флуктуации атомов тела; б) воздействие внешней силы на напряженную межатомную связь [257]

С.Н. Журковым и С.А. Абасовым показано, что временной фактор является фундаментальной характеристикой прочности твердых тел [111]. Рассматривая процесс разрушения в отрыве от времени, нельзя понять физические основы процесса разрушения. Формула (1.6.1) показывает, что разрушение твердых тел есть процесс активационный, скорость которого определяется частотой или средним временем ожидания тепловых флуктуаций. Чтобы разорвать связи, отвечающие за прочность материала твердого тела, необходимо преодолеть энергетический барьер U_0 , величина которого зависит от природы разрываемых межатомных связей.

В настоящее время существуют работы по прочности тел, основанные на кинетической теории прочности. Так, в работе А.А. Вакуленко и С.А. Кукушкина [57] развиты кинетические методы исследования разрушения твердых тел. Авторами предложена феноменологическая модель эволюции микрополостей при нагружении материалов, на основании которой исследуется кинетика хрупкого разрушения линейно-упругой деформируемой среды с микрополостью. П.А. Глебов-

ским и Ю.В. Петровым [80] рассмотрен критерий инкубационного времени разрушения с учетом кинетической концепции прочности. В работе А.Л. Волинского предпринята попытка применить уравнение (1.6.1) для планеты Земля, с целью прогнозирования ее деформационно-прочностных свойств [67], однако существенные трудности возникают при определении параметров, входящих в расчетное уравнение. Профессором В.И. Гузеевым на основе формулы (1.6.1) предложена методика назначения режимов обработки на станках с ЧПУ, обеспечивающих требуемую стойкость инструмента [92].

Абразивное зерно, участвующее в квазипериодическом контакте с материалом заготовки, подвергается сложному нагружению. Рассматривая тело, подвергающееся многоцикловой нагрузке, вызывающей в материале напряжения σ , изменяющиеся во времени t по периодическому закону

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{2}(1 - \cos\omega t), \quad (1.6.2)$$

С.Н. Журковым, В.Р. Регелем и др. получена зависимость $\tau_{ц}$ для такого тела [257]:

$$\tau_{ц} = N_{ц} t_0 \frac{I_0\left(i, \frac{\gamma\sigma}{2kT_t}\right)}{\exp\frac{\gamma\sigma}{2kT_t}}, \quad (1.6.3)$$

Учитывая, что в научно-технической литературе отсутствуют математические модели, описывающие процесс механического изнашивания абразивного зерна во времени, модель (1.6.3), полученная для случая сложномеханического нагружения твердого тела, работающего в условиях цикловой нагрузки [257], применима для условий работы абразивного зерна в ШК.

1.6.2. Физико-химический износ абразивного зерна в процессах шлифования

В фундаментальной науке принято считать диффузию в твердых телах, что применимо и к шлифованию, процессом вялотекущим, медленным. Вследствие этого существует мнение, что диффузионные процессы, протекающие (если даже протекающие) в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом, не могут оказывать ощутимого влияния на общую величину износа тела. Однако

результаты большого количества исследований, выполненных в этом направлении, говорят об обратном. Химическое сродство абразивного и обрабатываемого материала, наличие высоких температур в контактной паре «абразив – обрабатываемый материал», контакт ювенильных поверхностей как абразивного зерна, так и шлифуемой поверхности, а также большие силы трения – все эти факторы являются достаточными условиями для возникновения и протекания физико-химических явлений между абразивным и обрабатываемым материалом. В результате этого диффузионные процессы между абразивным и обрабатываемым материалом могут играть решающую роль в износе абразивных зерен инструмента.

Известно, что отличительными особенностями контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом являются его кратковременность и высокая температура. Кроме того, при шлифовании работу по удалению припуска с обрабатываемой поверхности совершают отдельные зерна, имеющие различную геометрию, различным образом расположенные в ШК. Стохастическое расположение абразивных зерен в круге приводит к неравномерности их расположения на его поверхности, вследствие чего часть абразивных зерен, расположенных на рабочем профиле круга, вообще не участвует в снятии припуска, другие зерна контактируют с обрабатываемой поверхностью лишь вершинами. Только порядка 10 % от общего числа зерен круга имеют полноценный контакт по площадке затупления с обрабатываемой поверхностью и совершают работу по удалению единичной стружки [311, 312]. Относительно последних Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучава высказали предположение, что каждое абразивное зерно, участвующее в снятии единичной стружки своей режущей кромкой сначала производит только трение, а в последствии пластический сдвиг элементарного объема металла, что является резанием [176]. Кроме того, на рабочей поверхности абразивных зерен в результате правки и в процессе резания формируется специфический субмикропрофиль [241], что повышает вероятность физических и химических реакций между абразивным и обрабатываемым материалом.

Основными предпосылками для протекания физико-химического взаимодействия между абразивным и обрабатываемым материалами являются:

1. Химическое сродство между контактируемыми материалами.

Под химическим сродством следует понимать способность различных веществ взаимодействовать между собой с образованием новых веществ. Другими словами, это параметр термодинамической системы, характеризующий ее отклонение от состояния химического равновесия [163]. Химическое сродство может быть выражено формулой:

$$D_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^k a_i \mu_i - \sum_{j=k+1}^{k+m} b_j \mu_j, \quad (1.6.4)$$

где μ_i и μ_j – химические потенциалы реагентов и продуктов реакции соответственно, а a и b – стехиометрические коэффициенты уравнения реакции.

Численные значения коэффициентов химического сродства реагентов реакций, протекающих в контакте абразивного зерна и обрабатываемого материала, могут служить ориентиром в прогнозировании величины объемов веществ, полученных в результате таких реакций.

2. Высокая температура в зоне шлифования.

Существует большое число исследований, направленных на измерение контактной температуры в зоне шлифования. При этом критериальными оценками всегда являются предельные температуры, вызывающие прижог обрабатываемой поверхности, изменение структуры ее поверхностных слоев. Температура самого абразивного зерна практически не исследовалась, несмотря на то, что с точки зрения физико-химических процессов, протекающих в контакте абразивного зерна с обрабатываемым материалом, именно температура контактируемого тела играет решающую роль.

Японскими учеными в 1985 году был спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий напрямую измерять температуру абразивного зерна на поверхности ШК с помощью специального инфракрасного детектора с чувствительным элементом [300]. В соответствии с полученными ими данными, температура отдельных абразивных зерен находится в пределах 800...1200 °С. Автора-

ми также подчеркивается, что абразивное зерно нагревается до температуры около 1400 °С и сохраняет тепло в течение длительного времени. Кроме того, наличие высоких контактных температур, сравнимых с температурами плавления стали, неоднократно подтверждалось другими авторами [129, 154, 182 и др.].

Температура в зоне контакта абразивного инструмента и шлифуемой заготовки является катализатором протекания физико-химических процессов между материалом абразивного зерна и материалом обрабатываемой заготовки. В доказательство этого учеными ВНИИАШа была исследована реакционная способность электрокорунда при его нагреве (рисунок 1.6.2, а). Приведенный рисунок говорит о том, что уже при 600 °С, что вполне сопоставимо с температурой шлифования, электрокорунд проявляет свою реакционную способность и начинает интенсивно реагировать со связкой, растворяясь в ней [297]. Е.Н. Масловым приводятся данные по насыщению шлифованной поверхности алюминием (рисунок 1.6.2, б), что говорит о его переносе из абразивного материала [182].

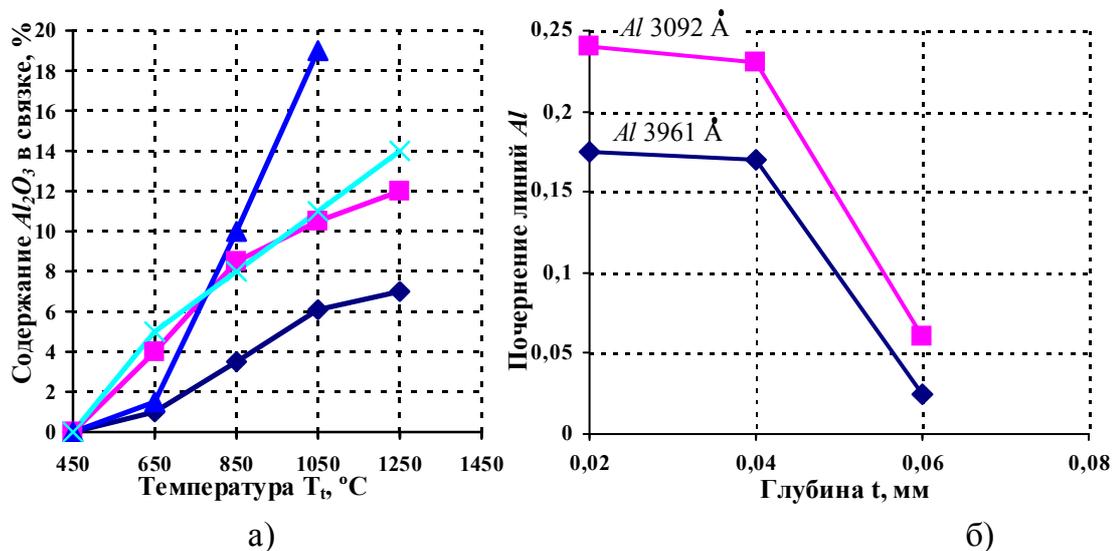


Рисунок 1.6.2 – Физико-химическая активность абразивного материала:
 а) изменение содержания Al_2O_3 в керамических связках в зависимости от температуры обжига изделия [297]; б) количественная оценка содержания абразивного материала в поверхностном слое шлифованной стали [182].

3. Наличие на поверхности шлифуемой детали окисных пленок.

Взаимное разрушение и постоянное обновление контактируемых поверхностей абразивного зерна и поверхности обрабатываемой заготовки, высокие контактные температуры шлифования, соизмеримые с температурой плавления мате-

риала заготовки, а также постоянное наличие кислорода в зоне шлифования являются предпосылками к протеканию большого количества микрометаллургических реакций на поверхности заготовки, в том числе окислительных. С первых секунд контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом на поверхности заготовки начинаются интенсивные окислительные реакции: образование поверхностной пленки, состав которой зависит от химического состава материала заготовки. В состав такой пленки входят окислы основного металла – железа, а также элементов, легирующих данный материал. Скорость образования окисной пленки определяется интенсивностью окисления того или иного химического элемента, составляющего лигатуру шлифуемой стали, что, в свою очередь, определяется значением упругости диссоциации окислов элемента [95, 306, 319]. При температуре 1600 °К и прочих одинаковых условиях легирующие элементы по возрастанию сродства к кислороду располагаются в следующий ряд:



Чем правее элемент находится от железа, тем интенсивнее он окисляется.

Несмотря на химическую стойкость электрокорунда к железоуглеродистым сплавам при достаточно высоких температурах, а также на то, что температура плавления электрокорунда достаточно высока (около 2050 °С), в процессе шлифования абразивный материал интенсивно взаимодействует с окисными пленками, образовавшимися на поверхности шлифуемой заготовки. Результатом этого является образование легкоплавких эвтектик, с температурами плавления близкими к температурам шлифования. Это взаимодействие можно проследить на диаграммах состояния двойных и тройных систем (рисунок 1.6.3) [37], а также в работах Н.В. Алексеевой [6], А.Г. Довгаля [96], С.И. Шорникова [325] и др. Рассмотренные физико-химические процессы, протекающие при синтезе абразивных материалов, также указывают на их химическую активность к различным оксидам [70]. Кроме того, взаимодействие электрокорунда с различными материалами при высоких температурах положено в основу методики создания защитных термомобильных покрытий [50].

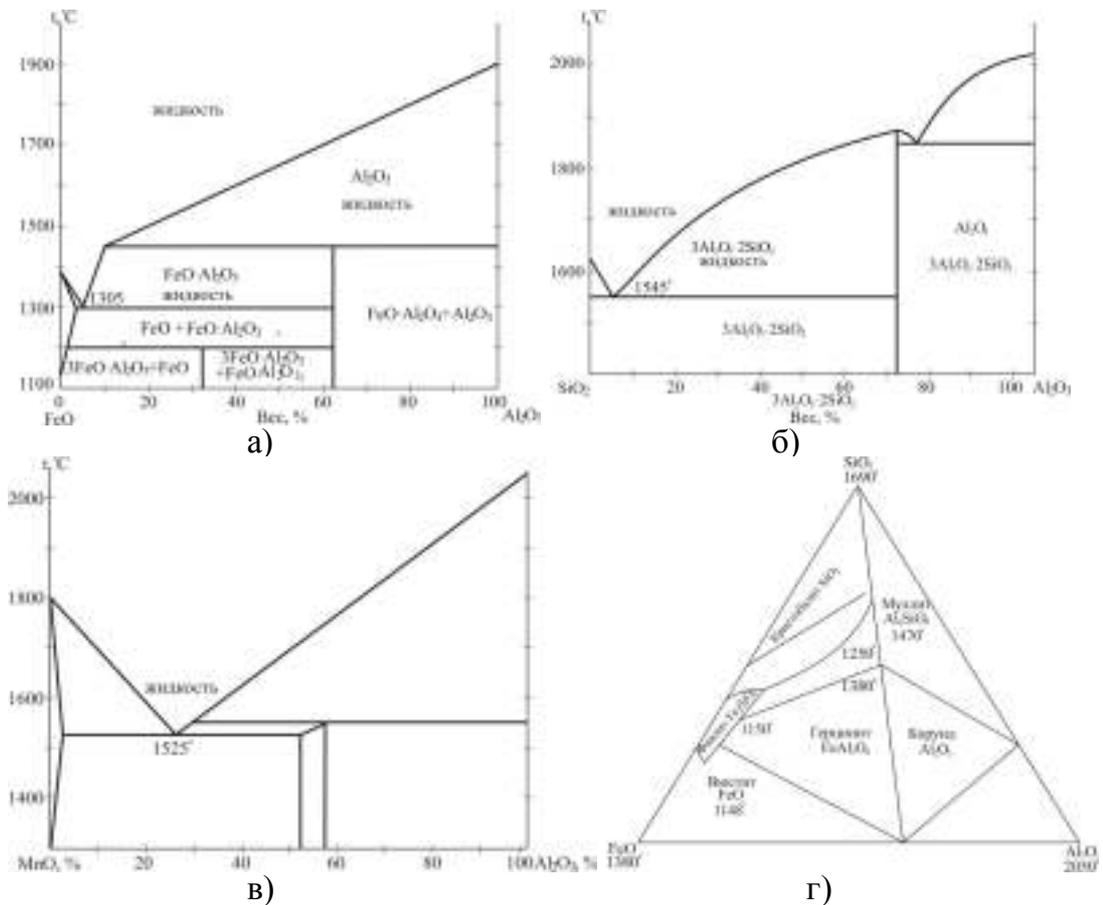


Рисунок 1.6.3 – Диаграммы состояния Al_2O_3 с другими соединениями
а) FeO; б) SiO_2 ; в) MnO; г) FeO– SiO_2

Для моделирования равновесных состояний системы Al_2O_3 –FeO и Al_2O_3 – SiO_2 использован пакет Terra, который позволяет исследовать предельно равновесные состояния многокомпонентных систем. Пакет реализует созданные в МГТУ им. Н.Э. Баумана метод и алгоритм расчета. В результате получено, что в рассматриваемых системах при температурах шлифования возможно образование соединений, типа $FeAl_2O_4$, Al_2SiO_5 , $MnAl_2O_4$ и т.д. (рисунок 1.6.4). Из рисунка 1.6.4 видно, что с оксидом железа при 1000 °C образуется шпинельное соединение «герцинит», а с оксидом кремния уже при 500 °C электрокорунд способен образовывать соединения типа «силлиманит».

В работе А.А. Кимяшова указывается на образование вещества «герцинит» – $FeAl_2O_4$ – в системе «Fe–Al–O» [137], а в работе Е.И. Махаринского [185], что понижение режущей способности ШК связано с химическими и диффузионными процессами на границе «абразивное зерно – шлифуемый материал».

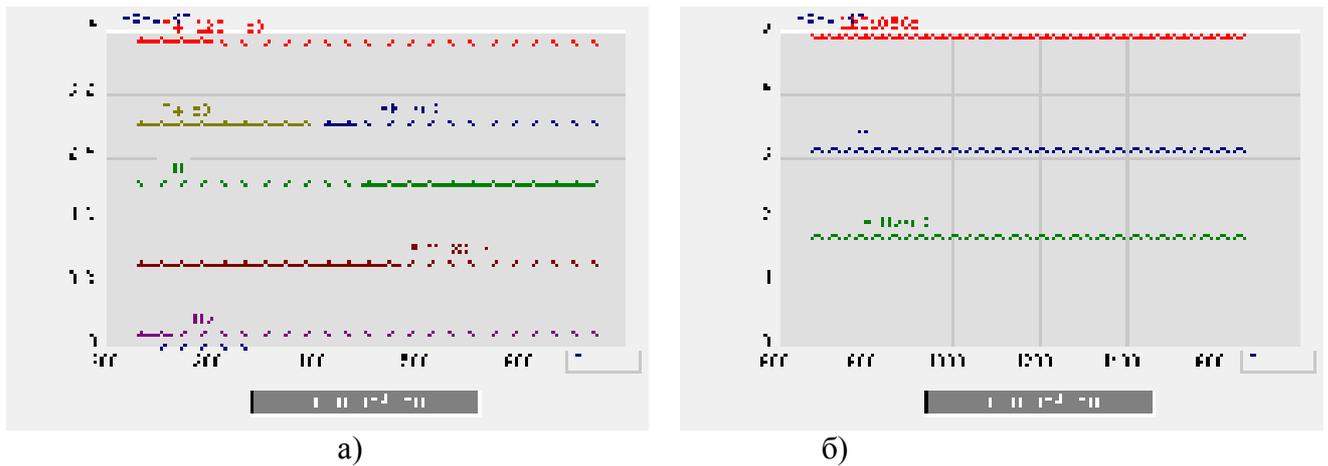


Рисунок 1.6.4 – Результаты расчета равновесных систем в пакете Terra:
а) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--FeO}$; б) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$

Также, в литературе, посвященной изучению процессов износа абразивного зерна при шлифовании, приводится большое количество разнородных исследований, направленных на изучение физико-химических процессов в зоне контакта единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Это работы Г.И. Грановского, Н.Н. Зорева, В.Ф. Боброва [39], Н.И. Богомолова, Г.И. Саютина, А.П. Татарина, В.А. Носенко, И.В. Харченко, В.Ф. Бердикова, В.М. Сновидова, Н.Ф. Ларионова [40, 42, 207, 270–272], Г.И. Ливерант [172], К.В. Савицкого, В.Н. Кашеева, М.А. Илющенко, А.Ф. Быкони, [268], Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучавы [175–178], И.В. Носовой, В.М. Шумячера, С.В. Носенко, В.А. Носенко, Л.Л. Кременецкого [210, 213], А.В. Славина [283], Л.В. Худобина, А.Н. Унянина [310] и др. Однако, все эти работы не содержат количественных характеристик, позволяющих учесть интенсивность протекания физико-химических реакций между абразивным и обрабатываемым материалом при шлифовании и определить величину изношенной части абразивного зерна.

Результаты исследования, выполненного И.В. Лавровым, позволяют качественно оценить интенсивность протекания физико-химических реакций между абразивным и обрабатываемым материалом (таблица 1.6.4.). При этом отсутствует возможность рассчитать величину части абразивного зерна, изношенную в результате действия рассматриваемого вида износа [171].

Таблица 1.6.4 – Особенности протекания физико-химических реакций между различными абразивными материалами и металлами

Металл	Условия и интенсивность взаимодействия с металлом		
	карбида кремния	электрокорунда	циркониевого электрокорунда
Cu	Взаимодействует в вакууме при 1300 °С	Взаимодействует в слабоокислительной среде при 1300 °С	–
Al	Взаимодействует в вакууме при 1100 °С	–	–
Si	Не взаимодействует в вакууме	Взаимодействует при 1000 °С	Взаимодействует интенсивно
Ti	Взаимодействует в вакууме при 1250 °С	Взаимодействует в вакууме при 1300 °С	Взаимодействует слабо в вакууме при 1300 °С
Nb	Взаимодействует в вакууме при 1300 °С	Взаимодействует в вакууме при 1900 °С	Взаимодействует в вакууме при 1700 °С
Ta	Взаимодействует в вакууме, при 1200 °С	Не взаимодействует в вакууме	–
Cr	Взаимодействует в восстановительной среде при 1700 °С	–	–
W	Взаимодействует в вакууме при 1500 °С	Не взаимодействует в вакууме при 1900 °С	Не взаимодействует в вакууме при 2100 °С
Mo	Взаимодействует в вакууме при 1200 °С	Не взаимодействует в вакууме при 1900 °С	Не взаимодействует в вакууме при 2100 °С
Mn	Взаимодействует в восстановительной среде при 1300 °С	Взаимодействует в слабоокислительной среде при 1100 °С	–
Fe	Взаимодействует в вакууме при 1250 °С	Не взаимодействует в вакууме при 1200 °С	Не взаимодействует в вакууме при 1200 °С
Co	Взаимодействует при 1000 °С	–	–
Ni	Взаимодействует в вакууме при 1200 °С	Не взаимодействует	Не взаимодействует

Достаточно полные исследования физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов выполнены Г.И. Саютиным и В.А. Носенко [273]. Ими рассматривалась обработка титановых сплавов абразивным инструментом из карбида кремния. Основным критерием интенсивности взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым авторами принят суммарный прирост концентрации химических элементов абразивов на шлифованной поверхности. Результаты исследования показали прирост на шлифованной поверхности концентрации кремния примерно в 4...5 раз по сравнению с исходным состоянием [273]. По полученным авторами данным можно выбирать оптимальные

сочетания абразивного и обрабатываемого материала по изобарно-изотермическому потенциалу реакций и по величине коэффициента диффузии элементов абразива и обрабатываемого материала. Также в рассматриваемой работе были установлены закономерности влияния интенсивности физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов на степень износа инструмента.

Однако результаты проведенных исследований не позволяют детерминировать физико-химический износ как самостоятельный процесс, и не дают возможности определить величину части абразивного зерна, изношенную в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Таким образом, при шлифовании сталей и сплавов различного химсостава инициируются процессы, схожие с микрометаллургическими: на поверхности обрабатываемой заготовки образуются окисные пленки, с химическим составом, зависящим от лигатуры основного материала, которые интенсивно взаимодействуют с абразивным материалом. Это приводит к образованию легкоплавких соединений, что отрицательно сказывается на производительности процесса, т.к. оказывает влияние на величину и интенсивность износа абразивных зерен. Результаты имитационного моделирования говорят о том же: при шлифовании образуются эвтектические соединения, в результате чего происходит потеря электрокорундом своей исходной теплостойкости и его интенсивный износ.

Рассмотреть влияние отдельного химического элемента, входящего в состав обрабатываемого материала, на описанные выше процессы крайне затруднительно. Учет интенсивности физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов в процессах шлифования можно вести при помощи эмпирических коэффициентов, как это выполнено в работах Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучавы [175–178]. В частности, по мнению авторов в контакте «режущий материал – обрабатываемый материал» при высоких скоростях и температурах резания возможно протекание либо гетеродиффузии, результатом которого является твердый раствор с решеткой растворителя, либо реактивной диффузии, которая приводит к протеканию химической реакции и образованию соединения на

границе контактирующих материалов [177]. Ими получена формула для расчета величины массы изношенной части абразива $M_a^{\phi-x}$ в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом [177]:

$$M_{a.z.}^{\phi-x} = 0,08G \frac{M_m}{m} C_0 J_3^{3/2} D^{1/2} L_k V_k^{1/2} \frac{T}{D_k} \quad (1.6.5)$$

В научно-технической литературе не обнаружено иных математических моделей, позволяющих количественно оценить физико-химическое взаимодействие абразивного и обрабатываемого материалов. В связи с этим, модель (1.6.5) может быть использована для прогнозирования величины массы абразивного материала $M_a^{\phi-x}$, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом. Трудноопределимым параметром в формуле (1.6.5) является коэффициент диффузии D , поскольку он является функцией многих переменных, в том числе и температуры [44, 45]. Этот коэффициент известен в большинстве исследований для чистых материалов – железа, алмаза и др. Учитывая многообразие легирующих элементов, применяемых для производства сталей и сплавов, этот коэффициент необходимо рассматривать как комплексный, характеризующий интенсивность физико-химического взаимодействия конкретного абразивного и обрабатываемого материала при шлифовании. Необходима методика, позволяющая определять величину этого коэффициента для различных условий взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала.

Решение очерченного в п. 1.6 круга задач позволит разработать комплексную модель износа единичного абразивного зерна, позволяющую спрогнозировать его величину для различных характеристик ШК, при обработке разных марок сталей и сплавов на различных режимах шлифования. Модели (1.6.3) и (1.6.5) в качестве аргумента содержат время взаимодействия зерна с обрабатываемой заготовкой. Это, в свою очередь, дает основание полагать, что разработанная в результате работы модель износа абразивного зерна позволит прогнозировать изменение его величины во времени работы инструмента.

1.7. Выводы. Рабочая гипотеза, цель и задачи работы

Подводя итог анализа состояния дел в области методик проектирования операций шлифования, прогнозирования результатов выполнения технологических процессов механической обработки деталей на станках, существующих работ по описанию работоспособности ШК, а также методик описания и определения величины износа абразивного инструмента, можно заключить следующее:

1. Современные технологические компьютерные пакеты в области механической обработки деталей машин, широко применяемые в настоящее время в технологических службах на машиностроительных предприятиях, не дают возможности осуществить комплексное имитационное моделирование процесса механической обработки. Это не позволяет получить результаты по качеству обработки и не дает возможность варьирования технологическими условиями выполнения технологического процесса. При этом в других областях машиностроения – обработка металлов давлением, термическая обработка и др. – существуют и вполне успешно применяются имитационные модули, позволяющие без изготовления опытной партии моделировать процесс при различных исходных технологических условиях и прогнозировать его результаты. Это является достаточно эффективным средством автоматизации технологической подготовки производства и обеспечения бездефектных технологических процессов, а также способствует максимальному использованию ресурса как оборудования, так и инструмента.

2. Существующие в настоящее время методики выбора характеристики ШК и назначения режимов шлифования можно разделить на две категории: первая – рекомендации ОМН, использование которых в современном многономенклатурном машиностроении приводит к существенным простоям оборудования, вызванным частой сменой ШК и, как следствие, значительным финансовым потерям. Кроме того, назначенные режимы не являются оптимальными для реализации операции шлифования инструментом выбранной характеристики. Вторая группа методик проектирования операций шлифования – эмпирические. Они построены на материале, полученном по результатам испытаний инструмента в различных технологических условиях. Такого рода методики решают задачу режимно-

инструментального оснащения операций абразивной обработки в очень узком диапазоне технологических условий, соответствующем исходным параметрам испытаний, не позволяя проектировать операцию шлифования в полном объеме: выбирать характеристику ШК и назначать режимы обработки.

3. Имеющиеся в настоящее время методики комплексного описания работоспособности абразивного инструмента, системы сбора, записи и хранения данных о работоспособности абразивных инструментов значительно повышают эффективность применения абразивных инструментов в различных технологических условиях. Однако это требует проведения достаточно больших серий испытаний инструмента в широком диапазоне технологических условий (различные шлифуемые материалы, точность обработки и шероховатость поверхности и др.), что, в свою очередь, также делает указанные методики малоэффективными в современном многономенклатурном производстве.

4. Среди имеющихся способов прогнозирования результатов механической обработки деталей на шлифовальных станках наиболее перспективным является имитационное моделирование процессов взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой заготовки. Подобные методики малозатратны и получают все большее распространение.

5. Основным параметром в большей степени определяющим работоспособность инструмента является износ рабочих зерен. Имитационное моделирование процессов абразивной обработки, реализуемое с целью прогнозирования величин эксплуатационных показателей ШК, должно выполняться с учетом интенсивности затупления абразивных зерен инструмента. Это позволит спрогнозировать работоспособность инструмента во времени его работы.

6. В настоящее время не существует обобщенной модели износа абразивных зерен ШК, учитывающей параметры его характеристики, технологические условия эксплуатации инструмента и время его работы. При абразивной обработке большинства конструкционных материалов наиболее распространенными механизмами износа абразивного зерна являются механический и физико-химический. При этом ни механический, ни физико-химический износ абразивно-

го зерна в процессах шлифования не описаны какими-либо количественными характеристиками, а оцениваются лишь на качественном уровне.

7. Проектирование операций шлифования в многономенклатурном производстве (подбор характеристики ШК и режимов шлифования) в настоящее время выполняется интуитивно, на основе личного опыта рабочего-шлифовщика, либо с применением справочных рекомендаций, не являющихся работоспособными и адекватными условиям современного многономенклатурного производства.

8. Существует острая проблема, заключающаяся в отсутствии методики проектирования операций шлифования, обеспечивающей максимальное использование ресурса работоспособности инструмента конкретной характеристики, при выполнении требований эффективной технологии производства различных деталей малыми партиями.

Описанные факты создают **актуальную научную проблему**, решение которой имеет важное государственное хозяйственное значение: низкая эффективность операций абразивной обработки, вследствие неработоспособности существующих методик проектирования операций шлифования и отсутствия комплексной методики проектирования операций шлифования, с учетом эксплуатационных возможностей инструмента для условий многономенклатурного производства.

Выполненный анализ современных научных литературных источников позволяет сформулировать **рабочую гипотезу** настоящего исследования: для современного многономенклатурного машиностроения необходима новая методика проектирования операций абразивной обработки, позволяющая выбирать характеристику инструмента и режимы обработки на основе прогнозирования его работоспособности. Это позволит реализовать эффективную технологию обработки деталей, что существенно повысит эффективность операций шлифования в широком диапазоне технологических условий их реализации. Учитывая современную интенсивность развития материаловедения, потребность в проектировании эффективных процессов абразивной обработки новых материалов также становится актуальной.

Из рабочей гипотезы формулируется *цель работы*: повышение эффективности операций шлифования в многономенклатурном производстве на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Разработать методику континуального проектирования операций шлифования, позволяющую повысить их эффективность за счет учета работоспособности ШК в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, требования к качеству обработки).

2. Разработать математическую модель размера площадки затупления абразивного зерна, связывающую ее величину с параметрами эксплуатации инструмента (обрабатываемые материалы, режимы шлифования).

3. Создать методику прогнозирования эксплуатационных показателей ШК, позволяющую за счет учета текущей величины размера площадки затупления единичного абразивного зерна прогнозировать работоспособность инструмента для широкого диапазона технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования, требования к качеству обработки).

4. Разработать методику определения периода стойкости ШК, позволяющую определять режимно-временную область его рациональной эксплуатации на основе спрогнозированной работоспособности.

5. Разработать комплекс инженерных методик континуального проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, позволяющий повысить их эффективность за счет учета работоспособности инструмента в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, режимы шлифования, требования к качеству обработки).

6. Разработать алгоритмическое и информационное обеспечение контура технологической подготовки, осуществляющего автоматизированное проектирование операций шлифования на основе разработанной методики континуального проектирования операций шлифования.

7. Выполнить практическую реализацию, опытно-промышленную апробацию и внедрение результатов работы.

Глава 2. Разработка методики континуального проектирования операций шлифования

2.1. Формирование понятия «континуальное проектирование»

Как отмечалось ранее, в условиях современного многономенклатурного производства обрабатываемые заготовки поступают на обработку на станок в порядке, зависящем от конъюнктуры рынка. При этом основную часть параметров технологической среды, в которой происходит обработка деталей, следует считать квазипостоянной (характеристики станка, марка применяемого СОТС, квалификация рабочего и т.д.), а управление процессом осуществляется изменением характеристики применяемого инструмента и режимами обработки. При этом для проектирования операций шлифования необходимо постоянное обновление текущей информации о номенклатуре планируемых к обработке заготовок, эксплуатационных свойствах инструмента, его складских запасах, возможностях предприятий-поставщиков, технологической системе, в которой эксплуатируется инструмент и т.д. Обязательным условием также является наличие сведений о функциональных взаимосвязях между параметрами управления процессом или объектом и выходными показателями. При этом формирование управленческих решений осуществляется с учетом обратной связи, полученной от объекта управления, после реализации процесса для начальных условий. Это позволит системе в дальнейшем реализовать алгоритмы адаптации и самоорганизации.

Возмущающее воздействие на объект управления – ШК, а также выходные данные – результаты выполнения операции, являются многомерными массивами – информационными полями данных. Эти поля данных характеризуют континуальную среду, в которую интегрируется ШК с целью эксплуатации и обеспечения требований, предъявляемых к операции шлифования.

Описанная система является континуальной системой обработки информации, предложенной А.Б. Путилиным [250, 251]. Упрощенно взаимодействие объекта с континуальной средой показано на рисунке 2.1.1.



Рисунок 2.1.1 – Континуальная модель управления объектом [250, 251]

Конкретизируя, получаем среду взаимодействия ШК с внешними информационными полями:



Рисунок 2.1.2 – Континуальная среда эксплуатации ШК

При этом основными возмущающими воздействиями являются режимы обработки. Само же континуальное проектирование может быть реализовано только после получения сведений о работоспособности инструмента, базирующегося на прогнозировании эксплуатационных показателей инструментов в различных технологических условиях.

Сведения о работоспособности абразивного инструмента, эксплуатирующегося в условиях многономенклатурного производства, постоянно пополняются и являются исходными данными для решения задачи оптимизации как при выборе характеристики инструмента, так и при назначении режимов обработки. Выбранный в результате проектирования ШК должен обеспечивать выполнение требова-

ний, предъявляемых к деталям, производство которых запланировано в ближайший период времени. Кроме того, результатом применения разрабатываемой методики проектирования операций шлифования должно явиться выявление режимно-временной области рационального применения инструмента той или иной характеристики. В этом случае также может быть сформирована номенклатура абразивных инструментов, позволяющих обработать заготовки с выполнением требований чертежа готовой детали и требуемым уровнем производительности процесса.

Учитывая вышесказанное, применительно к абразивной обработке *под континуальным проектированием операций шлифования будем понимать* метод проектирования операций шлифования, при котором учитывается текущая производственная ситуация (заготовки поступают на станок мелкими партиями, при этом они разобщены: изготовлены из различных материалов, имеют различные размеры, геометрию, требования по качеству обработки и др.). Также учитывается работоспособность абразивных инструментов. Для этого необходимо для каждой партии изготавливаемых деталей определять область возможных режимов обработки, при которых с различным уровнем производительности выполняются все требования, предъявляемые к операции шлифования. При этом режимная область должна быть связана с текущей работоспособностью инструмента, с учетом времени работы.

Общая структура методики континуального проектирования операций шлифования показана на рисунке 2.1.3.

Реализация методики континуального проектирования операций шлифования в следующем. Известна перспективная производственная ситуация: заготовки для обработки будут поступать на станок партиями n (на рисунке показаны в виде плоскостей). При этом каждая партия заготовок изготовлена из своего материала, относящегося к определенной группе обрабатываемости материалов шлифованием (ГрОМ). К каждой партии предъявляется комплекс требований – точность размера (IT), шероховатость шлифованной поверхности (Ra) и др.

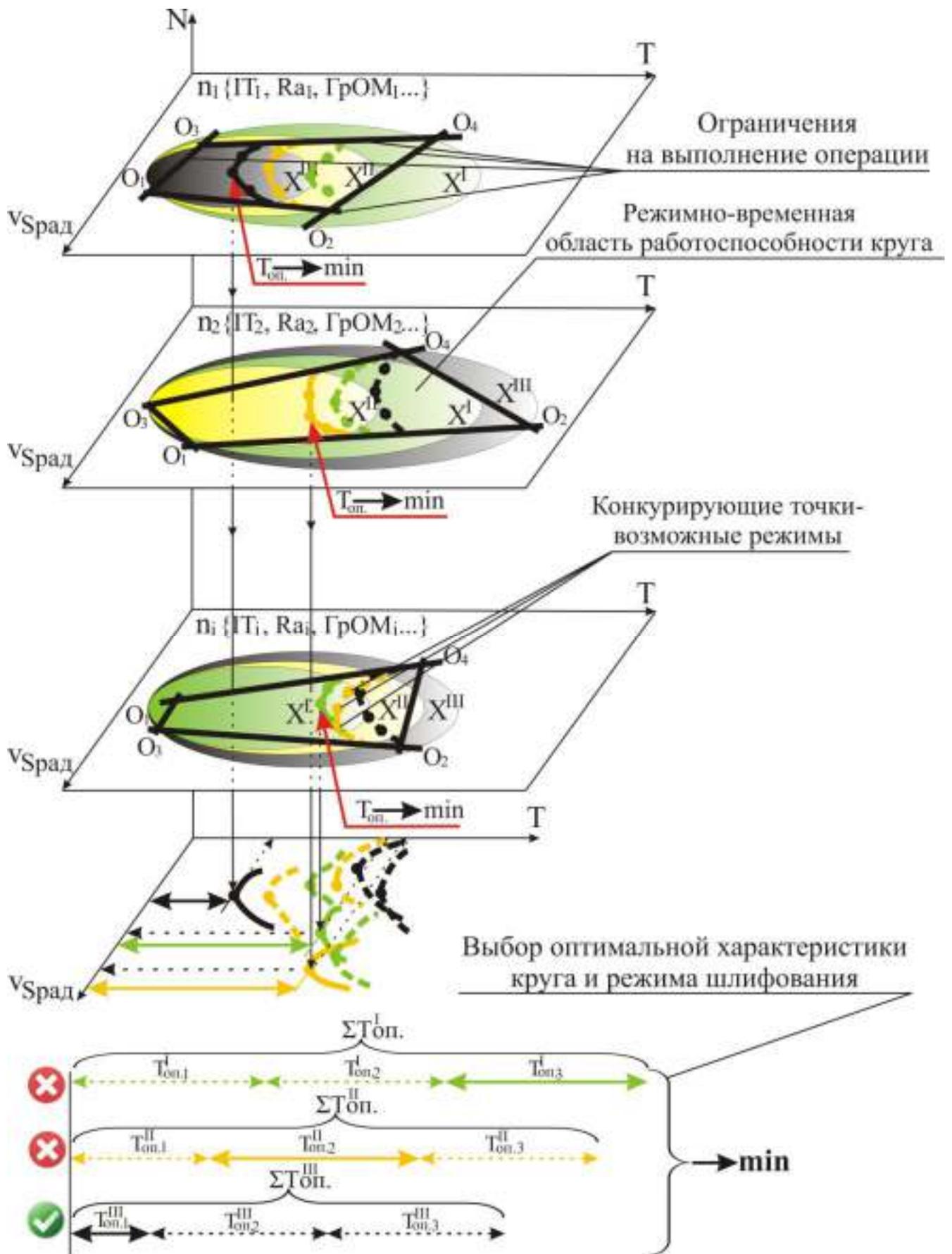


Рисунок 2.1.3 – Структура методики континуального проектирования операций шлифования

Для обработки этих заготовок имеется несколько ШК (X^I , X^{II} , X^{III}), обладающих определенной работоспособностью (показаны овалами различного цвета), входящих в номенклатуру инструмента, возможного к применению. Такая номенклатура ШК формируется на предварительном этапе проектирования, на основании справочных рекомендаций [218, 219, 258, 288 и др.], имеющегося производственного опыта или исходя из конкретных возможностей предприятия. Например, на складе может иметься определенный запас ШК, которые и могут рассматриваться как инструмент, возможный к применению. Такая ситуация характерна для мелкосерийного типа производства: приобретение нового инструмента не планируется, а необходимо использовать инструмент имеющийся на складе.

На работоспособность ШК накладывается комплекс ограничений O_i , соответствующий требованиям к изготовлению определенной партии деталей. Для каждого ШК X^i определяется режимно-временная область его эксплуатации, в которой на различных режимах обеспечивается выполнение всех требований O_i чертежа конкретной детали. Для производства каждой партии деталей определенным ШК определяется оперативное время $T_{оп}$. Это время включает в себя время на обработку детали – T_o , а также время на правку круга – $T_{пр}$. При этом для каждого сочетания «ШК – обрабатываемая партия» это время будет свое. Далее для каждой партии заготовок определяется ШК и режим шлифования, обеспечивающий минимум $T_{оп}$.

На завершающем этапе для каждого ШК определяется суммарное время обработки всех партий заготовок. В итоге, принимается ШК той характеристики, для которого суммарное $T_{оп}$ по всем партиям минимально, при этом для каждого ШК уже определен режим шлифования каждой партии заготовок.

Вариативный характер разработанной методики заключается в различных вариантах построения технологического процесса обработки партий заготовок, планируемых к обработке, т.е. вариант «обработать все партии деталей одним кругом» не является исключительным. В процессе обработки партий заготовок возможна замена ШК. Такой вариант развития событий возможен в случае, если ШК, установленный на станке для обработки первой партии заготовок является

настолько неэффективным для обработки последующих партий, что выгоднее его заменить, понести временные затраты на замену инструмента, которые будут оправданы высоким уровнем производительности другого ШК при обработке заготовок последующих партий. Для этого в состав определяемой части технической нормы времени необходимо включить время T_3 на замену ШК, которое, в свою очередь, также должно учитывать время доставки ШК к станку (рисунок 2.1.4).

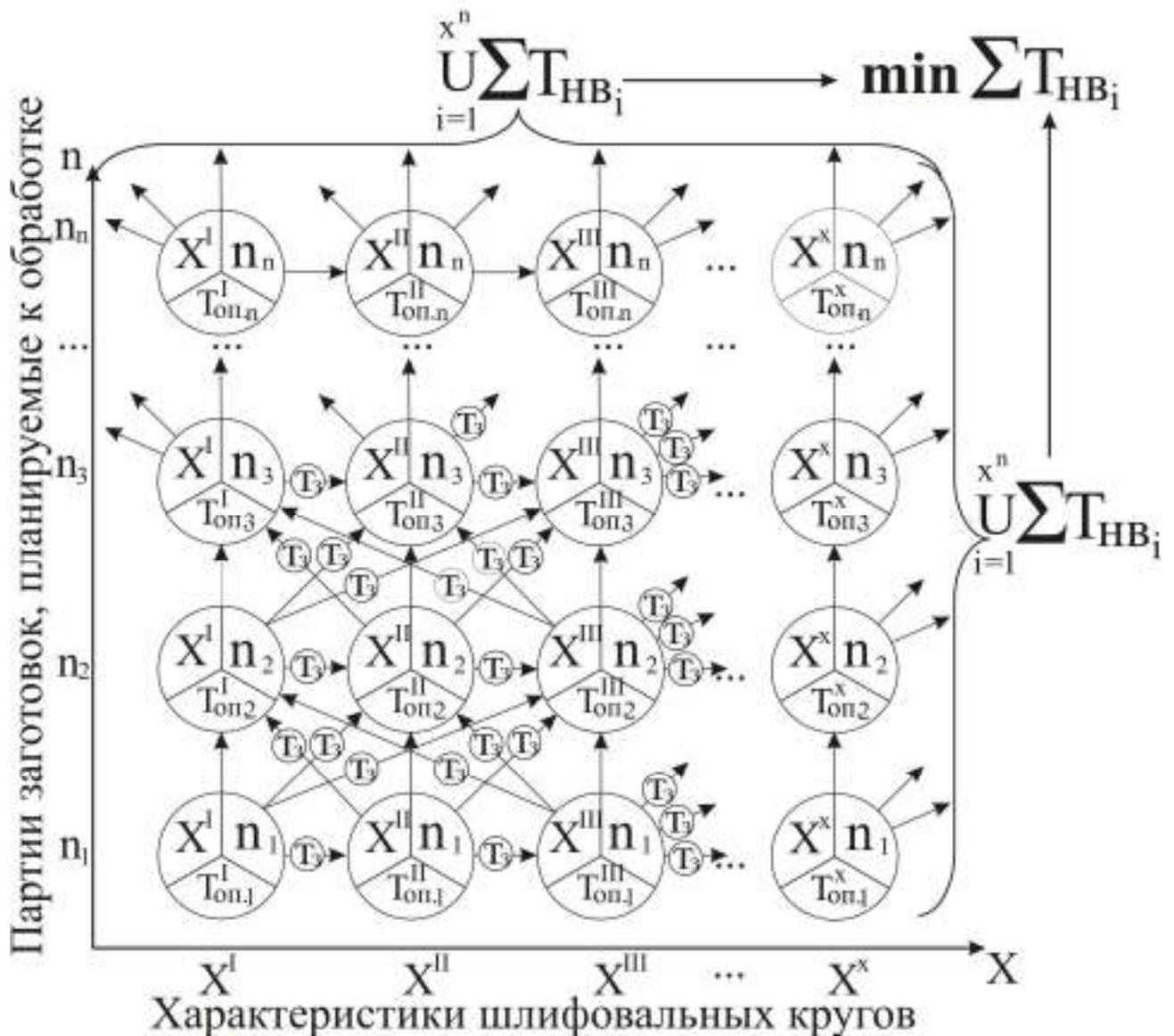


Рисунок 2.1.4 – Вариативный характер методики континуального проектирования

При помощи полного перебора возможных вариантов обработки возможно построение рационального порядка замены ШК на станке при обработке в запланированном периоде времени всех партий заготовок, изготовленных из различных материалов, с различными требованиями к качеству обработки (2.1.1).

$$\bigcup_{i=1}^{x^n} T_{н.в.} = \left\{ \begin{array}{l} T_{о.п.1}^I + T_{о.п.2}^I + T_{о.п.3}^I + T_3 \\ \dots \\ T_{о.п.1}^I + T_{о.п.2}^2 + T_{о.п.3}^II + 2T_3 \\ \dots \\ T_{о.п.1}^I + T_{о.п.2}^I + T_{о.п.3}^II + 2T_3 \\ \dots \\ T_{о.п.1}^{II} + T_{о.п.2}^I + T_{о.п.3}^{II} + 3T_3 \\ \dots \\ T_{о.п.1}^{II} + T_{о.п.2}^{III} + T_{о.п.3}^{II} + 3T_3 \\ \dots \\ T_{о.п.1}^3 + T_{о.п.2}^{II} + T_{о.п.3}^I + 3T_3 \\ \dots \\ T_{о.п.1}^{III} + T_{о.п.2}^I + T_{о.п.3}^{III} + 3T_3 \end{array} \right. \rightarrow \min \quad (2.1.1)$$

Условие, при выполнении которого выгодно осуществлять замену установленного ШК на станке (выполнять на рисунке 2.1.4 шаг по горизонтали, изменяя характеристику ШК) на инструмент, обеспечивающий меньшее время обработки партии заготовок, выглядит следующим образом:

$$\Delta T_{оп} > T_3, \quad (2.1.2)$$

где $\Delta T_{оп}$ – разница между суммарным оперативным временем обработки рассматриваемой партии заготовок ШК, установленным на станке и ШК, рекомендованным к применению.

Если условие (2.1.2) не выполняется, то обработку вновь поступающей на станок партии заготовок следует осуществлять инструментом, установленным на станке, не смотря на то, что он обеспечит большее суммарное время обработки.

В итоге разработанная методика континуального проектирования операций шлифования позволяет:

- назначить режимы шлифования различных заготовок при использовании ШК определенной характеристики в широком диапазоне технологических условий (различные материалы, требования по точности, шероховатости и др.) с различным уровнем производительности операций;

- назначить пару «характеристика ШК – режим шлифования» для обработки запланированной партии заготовок с выполнением требований по качеству обработки и минимальными затратами времени;
- сформировать рациональный порядок замены ШК на станке, при проектировании операций шлифования партий заготовок, планируемых к обработке в определенный период времени.

Более того, описанная выше методика открывает значительные возможности в области планирования производства: на основе континуального проектирования можно перераспределять потоки обрабатываемых заготовок, определяя приоритетность в соответствии с определенным уровнем производительности процесса, если таковое допускается ограничениями на сроки выполнения заказа.

Для реализации методики континуального проектирования операций шлифования возникает необходимость прогнозирования режимно-временной области эксплуатации ШК различных характеристик в широком диапазоне изменения технологических условий. Для этого необходимо создать систему прогнозных имитационных моделей основных показателей работоспособности абразивного инструмента.

2.2. Целевая функция

В общем случае, целевая оптимизационная функция при проектировании операций механической обработки в технологии машиностроения содержит в себе параметры, определяющие уровень достигаемых критериев, определяющих оптимальность того или иного решения поставленной задачи. В случае континуального проектирования операции шлифования, задача ее выполнения формулируется следующим образом: выбранные в результате проектирования операции характеристика ШК и режимы обработки в течение периода стойкости инструмента должны обеспечивать выполнение требований чертежа детали, при максимально возможной производительности процесса.

Известно, что период стойкости ШК – время его работы между двумя последовательными правками, в течение которого абразивный инструмент соответствует заданным требованиям [85]. Следовательно, продолжительность периода стойкости зависит не только от работоспособности и износостойкости инструмента, но также от требований, предъявляемых к выполнению операции шлифования. В результате у технолога, проектирующего операцию шлифования, возникает выбор: использовать выбранный ШК на максимальных режимах обработки, что приведет к быстрому его износу, минимальному периоду стойкости и частым правкам, или работая кругом на малых подачах обеспечить более продолжительный период его стойкости, сократив тем самым длительность циклов правки. В связи с этим в целевой функции должны быть учтены параметры, определяющие эффективность обоих вариантов, что позволит выбрать оптимальную характеристику ШК и режим шлифования. Частота и длительность процессов правки ШК целиком и полностью определяются режущими свойствами инструмента, а также зависят от его характеристики и требований к обработанной поверхности.

Поэтому в качестве целевой функции при континуальном проектировании операций шлифования целесообразно принять минимум неполной технической нормы времени $T_{\text{нв}}^*$, затрачиваемой на обработку данным ШК всех m партий, в каждой из которых n деталей, планируемых к обработке на данном станке. При этом в целевой функции также учитывается время $T_{\text{пр}}^i$ – на правку ШК, общее количество его правок p , производимых между периодами стойкости, а также время T_3 на замену ШК на станке требуемое количество раз f . Это необходимо для случая, если замена инструмента приведет к повышению производительности процесса обработки всех партий заготовок по сравнению с обработкой ШК, установленным на станке:

$$T_{\text{нв}}^* = \sum_{n=1}^m n \cdot T_o^n + \sum_{i=1}^{p_n} T_{\text{пр}}^i + f \cdot T_3 \rightarrow \min \quad (2.2.1)$$

В соответствии со справочными данными [218] определяем составляющие формулы (2.2.1):

- основное время для круглого врезного шлифования:

$$T_o = \frac{2\Pi}{2v_{\text{Срад}} \cdot K_{v\text{Срад}}}, \quad (2.2.2)$$

- основное время для круглого осциллирующего (с осевой подачей) шлифования:

$$T_o = \frac{l_{\text{ш}} \cdot 2\Pi}{v_{\text{Сoc}} \cdot K_{v\text{Сoc}} \cdot 2S_{\text{рад}} \cdot K_{\text{Срад}}}, \quad (2.2.3)$$

- основное время для плоского шлифования:

$$T_o = \frac{l_{\text{ш}} \cdot b_{\text{ш}}}{1000 \cdot v_3 \cdot S_{\text{oc}} \cdot q_n} \cdot \left(\frac{\Pi}{S_{\text{рад}} \cdot K_{\text{Срад}}} + i \right), \quad (2.2.4)$$

- время на правку ШК для любой схемы шлифования:

$$T_{\text{пр}} = \frac{B_k \cdot D_k \cdot i}{v_{\text{Сoc}} \cdot K_{v\text{Сoc1}} \cdot K_{v\text{Сoc2}} \cdot 50 \cdot 10^5}, \quad (2.2.5)$$

Время на замену ШК определяется по справочникам нормативов времени и для наладки средней сложности некоторых видов шлифования приведено в таблицах 2.2.1 и 2.2.2 [217].

Таблица 2.2.1 – Время на замену ШК на круглошлифовальных станках

Наименование работы	Наибольший размер устанавливаемого изделия, мм, до				
	400	600	800	1500	>1500
	Время T_3 , мин				
Заменить ШК	12	14	16	17	18

Таблица 2.2.2 – Время на замену ШК на плоскошлифовальных станках

Наименование работы	Длина стола, мм, до				Диаметр стола, мм, до		
	1000	2500	4000	>4000	400	800	1500
	Время T_3 , мин						
Заменить ШК	12	14	17	19	15	17	19

В таблице 2.2.3 приведены целевые функции для различных видов шлифовальных операций, с учетом формул 2.2.2–2.2.5 [218].

Таблица 2.2.3 – Целевые функции для различных операций шлифования

Вид операции	Целевая функция
Круглое врезное шлифование	$T_{\text{нв}}^* = \sum_{n=1}^m n \cdot \frac{2\Pi_i}{2v_{\text{спад}i}} + \left. \begin{aligned} &+ \sum_{i=1}^k \frac{B_i \cdot D_i \cdot i}{v_{\text{Soci}} \cdot K_{v\text{Soc}1i} \cdot K_{v\text{Soc}2i} \cdot 50 \cdot 10^5} + f \cdot T_3 \end{aligned} \right\} \rightarrow \min$
Круглое осциллирующее (с осевой подачей) шлифование	$T_{\text{нв}}^* = \sum_{n=1}^m n_i \cdot \frac{l_{\text{ши}i} \cdot 2\Pi_i}{v_{\text{Soci}} \cdot 2S_{\text{пад}i}} + \left. \begin{aligned} &+ \sum_{i=1}^k \frac{B_i \cdot D_i \cdot i}{v_{\text{Soci}} \cdot K_{v\text{Soc}1i} \cdot K_{v\text{Soc}2i} \cdot 50 \cdot 10^5} + f \cdot T_3 \end{aligned} \right\} \rightarrow \min$
Плоское шлифование периферией круга на станках с прямоугольным столом	$T_{\text{нв}}^* = \sum_{i=1}^m n_i \cdot \frac{l_{\text{ши}i} \cdot B_{\text{ши}i}}{1000 \cdot v_{zi} \cdot S_{\text{oci}} \cdot q_i} \cdot \left(\frac{\Pi_i}{S_{\text{пад}i}} + i_i \right) + \left. \begin{aligned} &+ \sum_{i=1}^k \frac{B_i \cdot D_i \cdot i}{v_{\text{Soci}} \cdot K_{v\text{Soc}1i} \cdot K_{v\text{Soc}2i} \cdot 50 \cdot 10^5} + f \cdot T_3 \end{aligned} \right\} \rightarrow \min$

Таким образом, для решения задачи выбора оптимальной характеристики ШК и режимов шлифования, для различных видов операций предложены целевые функции. Дальнейшее развитие работы посвящено круглому наружному врезному шлифованию.

2.3. Описание работоспособности шлифовального круга

2.3.1. Формирование набора показателей работоспособности шлифовальных кругов

Любой ШК предназначен для успешного выполнения операции шлифования, главной задачей которой всегда является получение детали, отвечающей всем требованиям чертежа. С этой точки зрения, наиболее важными показателями работоспособности ШК являются величины параметров, оговоренные конструктором в чертеже детали, основными из которых являются:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Точность формируемого размера – IT, мкм;} \\ \text{Шероховатость шлифованной поверхности – Ra, мкм;} \\ \text{Отсутствие прижогов} \end{array} \right. \quad (2.3.1)$$

Приведенные в (2.3.1) показатели являются результатом работы ШК и достижение их определенного уровня является основной задачей эксплуатации инструмента. Величины показателей (2.3.1) также зависят от условий эксплуатации инструмента. Следовательно, при описании работоспособности ШК необходимо учитывать исходные параметры эксплуатации инструмента:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Марка шлифуемого материала;} \\ \text{Вид операции шлифования;} \\ \text{Применяемое СОТС} \\ \text{и др.} \end{array} \right. \quad (2.3.2)$$

От марки шлифуемого материала зависят силовые и температурные характеристики процесса шлифования. Наиболее полные исследования в этом направлении выполнены Н.И. Волским [66], С.Н. Корчаком [148]. Исследования, выполненные А.А. Дьяконовым, связывают обрабатываемость материалов шлифованием с технологическими условиями реализации операции шлифования, в том числе со схемой шлифования и применяемой маркой СОТС [101, 103–105]. В результате, для разных материалов им определен параметр σ_i – действительное сопротивление материала шлифованию.

Существует большое количество работ, выполненных научной школой под руководством проф. Л.В. Худобина, посвященных управлению процессом шлифования путем изменения состава и метода подачи в зону обработки СОТС. Данные, приведенные в научной литературе, свидетельствуют о существенном влиянии марки СОТС, а также метода ее подачи в зону шлифования на величины показателей процесса шлифования [310–314].

Перечисленные в (2.3.2) параметры эксплуатации круга являются квазипостоянными и должны быть учтены при прогнозировании работоспособности ШК. Их учет может быть реализован напрямую, т.е. при прогнозировании показателей работоспособности ШК в исходных данных учитывается вид операции шлифования (например, через длину дуги контакта единичного абразивного зерна с поверхностью заготовки [182]), а также σ_i – действительное сопротивление материала шлифованию [101, 103, 105]. Учет состава и техники подачи СОТС в зону шлифования может быть реализован, в частности, при помощи поправочных коэффи-

циентов [258] на результаты прогнозирования, либо на основе достаточно большого числа теоретических и экспериментальных результатов по применению различных СОТС при обработке разных марок сталей сплавов [311–314].

Что касается режимов шлифования, то они являются переменными на протяжении всего времени эксплуатации ШК и являются фактором управления процессом. Именно за счет изменения режимов шлифования достигается уровень эксплуатационных показателей инструмента, приведенных в (2.3.1). Таким образом, набор эксплуатационных показателей, а также параметров эксплуатации инструмента, которые необходимо учитывать при комплексной оценке эксплуатационных свойств ШК выглядит следующим образом:

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ :

{ Точность формируемого размера – Π , мкм;
 { Шероховатость шлифованной поверхности – R_a , мкм;
 { Отсутствие прижогов

ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КВАЗИПОСТОЯННЫЕ :

{ Марка шлифуемого материала;
 { Вид операции шлифования;
 { Применяемое СОТС;

(2.3.3)

ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРЕМЕННЫЕ :

{ Режимы шлифования

2.3.2 Формализация показателей работоспособности

Для непосредственного определения величин эксплуатационных показателей ШК необходимо выполнить их формализацию, т.е. сопоставить каждый эксплуатационный показатель с параметром процесса шлифования, который представляется возможным определить для конкретного сочетания параметров эксплуатации.

Точность формируемого размера в решающей степени зависит от величины силы шлифования [148, 303]. Следовательно, для оценки точности размера, формируемого ШК при обработке, принимаем величину радиальной составляющей силы шлифования – P_y .

Шероховатость шлифованной поверхности, диктуемая чертежом детали, является прямым параметром, характеризующим качество шлифованной поверхности детали. Однако, учитывая, что процесс шлифования является цикловым, то независимо от количества ступеней в цикле для оценки качества шлифованной поверхности принимаем величину шероховатости R_a поверхности за весь цикл обработки.

Отсутствие прижогов на шлифованной поверхности также характеризует качество ее обработки. При комплексной оценке работоспособности ШК данное обстоятельство может быть учтено предельными режимами шлифования, превышение которых приводит к возникновению на обрабатываемой поверхности прижогов. В частности, по данным А.И. Исаева и С.С. Силина граничным условием возникновения прижогов является температура $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в заготовке на глубине $0,02\text{ мм}$ [120, 121]. Исследования Е.П. Калинина позволяют определить глубину прижога для жаропрочных и углеродистых сталей, исходя из температуры в зоне шлифования [129, 130]. Таким образом, отсутствие прижогов может быть определено величиной температуры $U(x)$ в зоне шлифования, как на качественном, так и на количественном уровне.

Кроме этого, необходимо учитывать, что обеспечение требуемого уровня эксплуатационных показателей, оговоренных выше, возможно в случае создания нормальных условий работы абразивных зерен круга, в частности, отсутствия интенсивного засаливания рабочей поверхности ШК. Именно засаливание является одним из доминирующих факторов, определяющим уровень работоспособности инструмента [310]. Необходимость учета этого ограничения также продиктована тем, что в многономенклатурном производстве заготовки, изготовленные из различных материалов, могут обрабатываться ШК характеристики, не предназначенной к эксплуатации в данных условиях, что не соответствует традиционным рекомендациям, сформированным, в том числе, с учетом отсутствия засаливания. Это обстоятельство может приводить к катастрофическому засаливанию рабочей поверхности ШК, что является неприемлемым. Ограничение по засаливаемости

для электрокорундовых инструментов может быть учтено следующим выражением [310]:

$$U(x) < k_n \cdot T_{пл}, \quad (2.3.4)$$

где k_n – коэффициент, зависящий от материала зерна и заготовки (0,80...0,85) [193]; $T_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала.

При выполнении условия (2.3.4) схватывание абразивного и обрабатываемого материалов отсутствует. Однако, даже если оно происходит, то в случае превышения температуры $T_{нт}$, определяемой по методике, предложенной Л.В. Худобиным и А.Н. Уняниным [310], возникший налип не сможет удержаться в поре абразивного круга за счет механических сил. Окончательно ограничение по засаливанию рабочей поверхности ШК выглядит следующим образом:

$$T_{нт} < U(x) < k_n \cdot T_{пл}. \quad (2.3.5)$$

В итоге, в комплекс показателей работоспособности ШК входят следующие показатели:

$$\begin{cases} P_y - \text{радиальная составляющая силы шлифования;} \\ Ra - \text{шероховатость поверхности;} \\ U(x) - \text{температура в зоне контакта ШК с заготовкой.} \end{cases} \quad (2.3.6)$$

Постоянная составляющая параметров эксплуатации ШК должна быть учтена в виде констант – исходных условий работы ШК, в которых оценивается его работоспособность. Переменный параметр эксплуатации – режим шлифования – является основным фактором управления процессом и устанавливается непосредственно на станке рабочим или наладчиком. Он является искомой величиной при проектировании операции шлифования.

2.3.3. Комплекс эксплуатационных показателей с учетом временной нестационарности процесса

Шлифование – метод обработки, которому свойственно интенсивное изменение характеристик самого инструмента, обрабатываемой поверхности, а также величин показателей, численно характеризующих процесс. Так, поданным Н.И. Богомолова и Г.И. Саютина [41], составляющая силы резания P_y к 7-ой минуте работы круга характеристики 24AF100M6V увеличивается примерно в 1,5

раза, по сравнению с первоначальным значением, по данным С.Н. Корчака [148], величина линейного износа круга твердости L при обработке заготовок из стали 45 за 10 минут его работы увеличивается в 3 раза, а круга твердости M – в 2 раза. В работе В.И. Муцянюк и В.И. Островского [196] показано, что при шлифовании стали P9Ф5 кругом 24AF90JV коэффициент шлифования за время работы ШК уменьшается примерно в 3 раза, по данным Н.И. Волского [66], за 25 минут работы ШК 14AF54KV мощность резания возрастает более чем на 50 %. Исследования Л.Н. Филимонова [304] показали, что режущая способность ШК из белого электрокорунда в начале шлифования заготовки из стали 40X увеличивается, а затем за 10 мин работы круга успевает уменьшиться более чем в 2 раза. Исследования А.В. Якимова [330] показали, что объемный износ ШК 24AF60L7V при шлифовании стали P18Ф2 за 20 минут работы увеличивается примерно в 9 раз. Также в работе Л.В. Худобина, А.Н. Унянина показано интенсивное изменение показателей шлифования во времени работы инструмента [310].

При создании автоматизированного испытательного комплекса ВНИИАШ были проведены исследования временного характера изменения показателей процесса шлифования [329]:

- средние значения сил шлифования;
- амплитуда колебаний сил резания;
- вибрации детали и круга;
- общая и эффективная мощность шлифования;
- радиальный износ круга и его макрогеометрия;
- волнистость детали, ее шероховатость;
- наличие прижогов на шлифованной поверхности.

Временная изменчивость показателей шлифования отмечается и зарубежными исследователями. В частности, S. LaChance, A. Warkentin, R. Bauer был разработан автоматизированный и достаточно точный метод измерения величины износа ШК в течение процесса шлифования [419].

На машиностроительных предприятиях в целях обеспечения стабильности качества выпускаемой продукции каждая вновь поступающая партия ШК, как

правило, подвергается входному контролю по проверке их эксплуатационных показателей. В результате входного контроля фиксируется количество деталей, изготовленных ШК за время его работы (полный ресурс), основное (технологическое) время операции – T_0 , а также период стойкости круга между правками – T , определяемый по какому-либо критерию.

В таблице 2.3.1 приведены примеры таких производственных данных, собранных с предприятий «АвтоВАЗ» и «КамАЗ», при круглом наружном врезном шлифовании материалов I группы обрабатываемости со снятием припуска от 0,3 до 1 мм. Из таблицы 2.3.1 видно, что среднее время работы ШК между правками составляет 15 мин, при этом обрабатывается от 10 до 50 деталей.

Таблица 2.3.1 – Средние величины периодов стойкости ШК различных характеристик

Характеристика круга	Стадия	Период стойкости круга между правками T	
		мин	детали, шт.
25AF90M6V	Окончательная	11,0	20
25A F90K6V		27,2	50
25A F90L6V		17,4	30
24A F90H7V		12,5	25
25AF60O6V		16,2	26
24A F60M7V	Предварительная	10,3	13
24A F46K7V		15,0	26
24AF60K7V		8,7	10
24AF90M7V		9,6	11

Для сравнения, в таблице 2.3.2 приведено время цикла, в течение которого изготавливается одна деталь, при обработке заготовок из стали I группы обрабатываемости, с припуском 0,3–1,0 мм, рассчитанное по нормативам режимов шлифования [218] для условий круглого наружного врезного шлифования.

Таблица 2.3.2 – Время цикла шлифования одной детали [218]

Припуск, мм	Диаметр заготовки, мм				
	20	50	80	100	160
	Время шлифования, мин				
0,3	0,23	0,36	0,45	0,51	0,65
0,5	0,31	0,49	0,61	0,70	0,86
1,0	—	0,61	0,77	0,86	1,08

Принимая величину среднего периода стойкости ШК равную 15 мин., сопоставляя её со временем шлифования одной детали (см. таблицу 2.3.2) получим,

что за период стойкости в зависимости от размера заготовки и величины припуска изготавливается от 13 до 65 деталей (таблица 2.3.3).

Таблица 2.3.3 – Количество деталей, изготовленных ШК за период стойкости

Припуск, мм	Диаметр заготовки, мм				
	20	50	80	100	160
Количество изготовленных деталей, шт.					
0,3	65	41	33	29	23
0,5	48	30	24	21	17
1,0	—	24	19	17	13

Приведенные данные по экспериментальным исследованиям изменения эксплуатационных показателей шлифования во времени, а также производственные данные таблиц 2.3.2. и 2.3.3 дают основание сделать вывод о том, что шлифование каждой последующей детали в течение периода стойкости инструмента происходит ШК с эксплуатационными свойствами отличными от тех, которыми он обладал в начале обработки. При этом за весь период стойкости эксплуатационные показатели ШК изменяются в значительной степени. Несмотря на это, в реальных производственных условиях назначение режимов шлифования для обработки следующей, после первой детали в партии осуществляется исходя из начальных режущих свойств инструмента, сформированных непосредственно после правки рабочей поверхности ШК, т.е. текущее состояние рабочей поверхности инструмента не учитывается.

Кроме этого, собственными исследованиями также доказана временная нестационарность эксплуатационных показателей ШК [153, 156]: в среднем, в течение времени работы ШК составляющие силы шлифования увеличиваются P_y – в 1,2–3,6, а P_z – в 1,3–5 раз; шероховатость R_a шлифованной поверхности возрастает в 1,2–4,6 раза в зависимости от характеристики применяемого инструмента, марки обрабатываемого материала и режимов шлифования.

Таким образом анализ экспериментальных данных, описанных в литературе, изучение производственного опыта эксплуатации ШК, а также проведенные собственные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что в течение периода стойкости ШК показатели процесса шлифования интенсивно изме-

няются. Учитывая, что в основу разработанной методики проектирования операций шлифования положен учет «континуальности» эксплуатационных показателей ШК, т.е. их изменчивости во времени, следует заключить, что при получении сведений о работоспособности ШК в различных технологических условиях необходимо учитывать временную нестационарность процесса шлифования.

В итоге, для сформированного комплекса показателей (2.3.3) в качестве первого учитываемого фактора принимаем управляемый технологический параметр – переменный параметр эксплуатации – режим шлифования (для условий круглого наружного врезного шлифования – $v_{\text{Срад}}$ – скорость радиальной подачи ШК). В качестве второго учитываемого фактора принимаем время шлифования T . В итоге, комплекс эксплуатационных показателей и учитываемых факторов, описывающий работоспособность ШК характеристики X_i для условий круглого врезного шлифования выглядит следующим образом:

$$X_i = \begin{cases} P_y = f(v_{\text{Срад}}, T) - \text{радиальная составляющая силы шлифования,} \\ \quad \text{как функция режима и времени шлифования, Н;} \\ Ra = f(v_{\text{Срад}}, T) - \text{шероховатость шлифованной поверхности,} \\ \quad \text{как функция режима и времени шлифования, мкм;} \\ U(x) = f(v_{\text{Срад}}, T) - \text{температура в зоне контакта круга с заготовкой,} \\ \quad \text{как функция режима и времени шлифования, град.} \end{cases} \quad (2.3.7)$$

Сформированный комплекс эксплуатационных показателей с учетом прямого технологического фактора – режима шлифования, а также нестационарности показателей во времени, является адекватным физическим процессам, происходящим при шлифовании.

2.4. Система технологических ограничений

Определение возможной режимно-временной зоны эксплуатации инструмента в конкретных технологических условиях производится путем наложения системы ограничений на его работоспособность и определением значения целевой функции при различных условиях выполнения операции шлифования. В соответствии со сформированным комплексом (2.3.7) набор ограничений содержит:

- ограничение по предельной силе шлифования – P_y :

$$P_{yэ} \leq P_{yn}, \quad (2.4.1)$$

где $P_{yэ}$ – величина радиальной составляющей силы шлифования, обеспечиваемая кругом данной характеристики в определенных условиях его эксплуатации; P_{yn} – величина радиальной составляющей силы шлифования, ограничиваемая точностью обработки, задаваемой чертежом n-ой детали;

- ограничение по шероховатости шлифованной поверхности – Ra :

$$Ra_э \leq Ra_n, \quad (2.4.2)$$

где $Ra_э$ – шероховатость поверхности, обеспечиваемая кругом данной характеристики в определенных условиях его эксплуатации; Ra_n – шероховатость поверхности, задаваемая чертежом n-ой детали.

- ограничение по прижогу (температуре шлифования) – $U(x)$:

$$U(x)_э \leq U(x)_n, \quad (2.4.3)$$

где $U(x)_э$ – температура в зоне шлифования, обеспечиваемая кругом данной характеристики в определенных условиях его эксплуатации; $U(x)_n$ – бесприжоговая температура при шлифовании n-ой детали.

Кроме указанных параметров система ограничений, накладываемых на эксплуатационные показатели ШК, может содержать не только требования, предъявляемые к качеству обрабатываемых партий деталей, но и технико-экономические критерии, такие как минимальный уровень производительности процесса, допустимая интенсивность износа абразивного инструмента, ограничение по потребляемой мощности шлифования (например, для операций обдирочного шлифования) и др. В этом случае в комплекс (2.3.7) необходимо вносить соответствующие показатели с целью определения их величин.

2.5. Выводы

1. Разработана методика континуального проектирования операции шлифования, ее структура и наполнение. Методика базируется на прогнозировании работоспособности ШК в широком диапазоне технологических условий и определении режимно-временной области эффективной эксплуатации инструмента.

2. Предложена целевая функция и набор технологических ограничений для реализации методики континуального проектирования операций шлифования.

Глава 3. Прогнозирование величины износа абразивного зерна в процессах шлифования

3.1. Основное уравнение для определения величины износа абразивного зерна при шлифовании

Для разработки комплексной модели износа абразивного зерна принимаются следующие допущения:

- основные механизмы износа, проявляющиеся совместно при контакте абразивного зерна с обрабатываемым материалом – механический и физико-химический;
- оба вида износа абразивного зерна действуют постоянно, на протяжении времени работы абразивного зерна с различной интенсивностью;
- суммарный объем изношенной части абразивного зерна складывается из объемов, изношенных в результате действия различных механизмов износа.

Износ абразивного зерна происходит в местах его соприкосновения с обрабатываемым материалом: на передней поверхности абразивного зерна, по которой сходит стружка, и по площадке затупления, где активируются процессы физико-химического характера.

В общем виде модель износа абразивного зерна в процессах шлифования, учитывающая основные механизмы его протекания, выглядит следующим образом:

$$M_{a.z.} = M_{a.z.}^M + M_{a.z.}^{\Phi-x}, \quad (3.1.1)$$

где $M_{a.z.}$ – масса части абразивного зерна, изношенной в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом, г; $M_{a.z.}^M$ – масса изношенной части абразивного зерна в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом, г; $M_{a.z.}^{\Phi-x}$ – масса изношенной части абразивного зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом, г.

Величину механического износа абразивного зерна будем определять на основе кинетической теории прочности твердого тела, испытывающего квазипериодические нагрузки (1.6.3), а величину износа зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом – по модели 1.6.5.

3.2. Модель термофлуктуационного разрушения абразивного зерна

3.2.1. Определение параметров, входящих в расчетное уравнение

Необходимо установить физический смысл каждого множителя формулы (1.6.3) применительно к абразивной обработке.

Параметр $N_{ц}$ – количество циклов нагружения абразивного зерна в единицу времени – число контактов режущей кромки зерна с обрабатываемым материалом в секунду. Определяется параметрами операции шлифования и может быть определен как величина, равная количеству оборотов ШК в секунду.

Параметр t_0 – длительность нагружения. Это время контакта режущей кромки абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Данный параметр полностью зависит от технологических параметров операции шлифования – скорости вращения ШК, скорости вращения заготовки, а также диаметра ШК, диаметра обрабатываемой заготовки и др. Применяя известные формулы Е. Н. Маслова [182] можно рассчитать время t_0 прохождения единичным зерном абразивного круга длины дуги контакта на детали L_k в условиях круглого наружного шлифования с радиальной подачей:

$$t_0 = \frac{L_k}{V_k} = \frac{\left(1 + \frac{v_z}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_z \cdot \frac{V_{\text{Срад}}}{n_z}}{D_k + d_z}}}{V_k}, \quad (3.2.1)$$

Параметр γ – коэффициент пропорциональности между средним напряжением, создаваемым силой приложенной непосредственно к твердому телу и напряжением, возникающим в единичной межатомной связи [257]. Величина параметра γ в идеальных телах приблизительно равна 10^{-23} . Для реальных материалов параметр γ имеет различную величину, зависящую как от строения материала, так и способа его предварительной обработки и состояния [257]. Расхождение между значениями γ , определенными для идеальных (теоретически) и реальных тел (экспериментально) может быть объяснено неравномерностью распределения нагрузки, приложенной к телу, среди межатомных связей: разрушение тела начинается

там, где присутствуют дислокации или имеются перенапряженные различными методами (термообработка, ППД, легирование и др.) межатомные связи. Это также вызвано неидеальностью строения реальных твердых тел: наличие микротрещин, дислокаций, внутренних концентраторов напряжений [257]. С.Н. Журковым был введен коэффициент перенапряжения межатомных связей q , численно оценивающий различие параметра γ для твердых тел. Предложены выкладки, изложенные В.Р. Регелем и др. [257], позволяющие укрупненно определить величину γ :

$$q = \frac{\gamma \cdot N_a \cdot \rho_a}{M_m}, \quad (3.2.2)$$

Выражая γ из (3.2.2), получаем выражение для его ориентировочного определения:

$$\gamma = \frac{q \cdot M_m}{N_a \cdot \rho_a} = \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \quad (3.2.3)$$

В таблице 3.2.1 приведены значения коэффициента γ для различных абразивных материалов.

Таблица 3.2.1 – Значения коэффициента γ для различных абразивных материалов

Материал	Коэффициент $\gamma, 10^{-23}$
Электрокорунд	4,36
Карбид кремния	2,08

Параметр σ – величина напряжения в теле абразивного зерна, возникающего вследствие действия силы шлифования, направленной вдоль вектора скорости движения зерна. Учитывая сложное напряженное состояние, в котором находится единичное абразивное зерно при шлифовании, получение численных значений напряжений, действующих в материале абразивного зерна, в условиях пульсирующей нагрузки, крайне затруднительно. Одним из возможных решений этой задачи является создание твердотельной модели и дальнейшее проведение численного имитационного моделирования взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой (п. 3.2.2).

В итоге, для условий круглого наружного врезного шлифования формула долговечности (1.6.3) при циклической нагрузке принимает вид:

$$\tau_{ц} = \frac{n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot \frac{V_{спад}}{n_3}}{D_k + d_3}} \cdot I_0 \left(i, \frac{\frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}{2kT_t} \right)}{60 \cdot V_k \cdot \frac{\frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}{\exp \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}} \quad (3.2.4)$$

Понятно, что параметры абразивного зерна (величина и интенсивность образования площадки затупления, угол заострения, прочностные характеристики и т.д.), испытывающего столь сложное многоцикловое термомеханическое нагружение, оказывают существенное влияние на величину напряжения в теле зерна. Фиксируя указанные выше аргументы, можно получить величину долговечности абразивного зерна под нагрузкой, соответствующей определенным технологическим условиям работы абразивных зерен ШК.

Переход к объемным величинам износа возможен имитационными методами моделирования процесса шлифования: определив элементарный объем абразивного материала $w_{а.з.}^M$, испытывающего напряжения σ и отделяющийся от зерна по истечении периода времени $\tau_{ц}$, задаваясь общим временем работы круга T , можно определить массу изношенной части абразивного зерна в результате его механического взаимодействия с обрабатываемым материалом:

$$M_{а.з.}^M = \frac{\rho_a \cdot w_{а.з.}^M \cdot T}{\tau_{ц}} \quad (3.2.5)$$

Подставляя (3.2.4) в (3.2.5) получаем общую формулу для определения массы абразивного материала, изношенного в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом

$$M_{а.з.}^M = \frac{60V_k \cdot \rho_a \cdot w_{а.з.}^M \cdot T \cdot \exp \frac{\frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}{2kT_t}}{n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot \frac{V_{спад}}{n_3}}{D_k + d_3}} \cdot I_0 \left(i, \frac{\frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}{2kT_t} \right)} \quad (3.2.6)$$

3.2.2. Имитационное моделирование напряженного состояния абразивного зерна в процессах шлифования

Расчет сложного напряженно-деформированного состояния абразивного зерна возможен с использованием численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ). При этом возможны два варианта. Первый заключается в создании конечно-элементной модели абразивного зерна с последующим приложением нагрузок, эквивалентных силе резания, действующей на зерно. Недостаток такого подхода заключается в том, что при этом невозможно учесть контактные явления (трение, износ, и т.д.). Кроме того, сложно найти экспериментальные данные о силе резания, действующей на одно зерно, для различных обрабатываемых и абразивных материалов. Второй подход заключается в том, чтобы численно смоделировать сам процесс резания с учетом контактных явлений, возникающих при этом. В этом случае нет необходимости собирать экспериментальные данные о силе резания, действующей на зерно, так как решается контактная задача с отделением стружки. В данной работе был использован второй подход.

Для определения величины напряжений в абразивном материале, соответствующей различным условиям шлифования была создана конечно-элементная модель, проведена серия численных экспериментов в пакете анализа ANSYS. В качестве абразивного материала принимался электрокорунд белый, учитывалось действительное сопротивление различных материалов (представителей разных групп обрабатываемости) шлифованию [101, 103–105], соответствующее различным температурам шлифования.

Учитывая результаты японских ученых по определению температуры абразивного зерна на поверхности ШК [300] для настоящего исследования температура нагружаемого тела – абразивного зерна – принималась в пределах 200–1000 °С, с шагом 200 °С.

Форма абразивного зерна принималась в виде усеченного конуса с площадкой износа, при этом размеры конуса принимались в соответствии с зернистостью. Учитывая довольно противоречивые данные о радиусе округления вершин острых, не участвовавших в работе зерен [170, 182, 209], исходная площадка за-

тупления на абразивном зерне принималась равной среднему радиусу округления острого зерна – 0,005 мм. Свойства материала заготовки и зерна приведены в таблице 3.2.2. Материал зерна – идеально-упругий. Материал заготовки – упругопластический, с билинейным кинематическим упрочнением и модулем упрочнения 200 МПа.

Таблица 3.2.2 – Свойства материалов заготовки и зерна

Свойство	Абразивный материал	Обрабатываемый материал (сталь 45)
Модуль упругости, МПа	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Плотность, кг/м ³	4000	7800
Предел текучести, МПа	–	200

Кулоновский коэффициент трения принимался равным 0,3. Конечноэлементная модель заготовки в виде параллелепипеда имеет длину 1 мм, ширину 0,2 мм и толщину 0,1 мм. Глубина резания единичным зерном – 0,01 мм. Скорость резания – 50 м/с. Критерий стружкоотделения задавался виде предельной деформации 20 %. Чтобы исключить разрушение материала при трехосном сжатии, при расчете критерия разрушения учитывалось только первая главная деформация.

Моделирование проводилось с помощью явного динамического анализа. Конусу сообщалось прямолинейное перемещение за заданный интервал времени (0,01 с). На каждом шаге интегрирования решалась контактная задача внедрения зерна в заготовку. Между заготовкой и зерном устанавливался контактный интерфейс, передающий усилие с зерна на заготовку, его контактная жесткость устанавливалась так, чтобы избежать чрезмерного внедрения зерна в заготовку.

Время расчета в зависимости от исходных условий составляло от 30 мин до 12 часов. В целях снижения времени расчета рассматривалась половина модели зерна и заготовки с приложением соответствующих граничных условий.

Конечноэлементная модель зерна представляет собой половину усеченного конуса. Для снижения влияния концентрации напряжений на нижнем основании конуса было сделано скругление радиусом 1 мкм (рисунок 3.2.1).

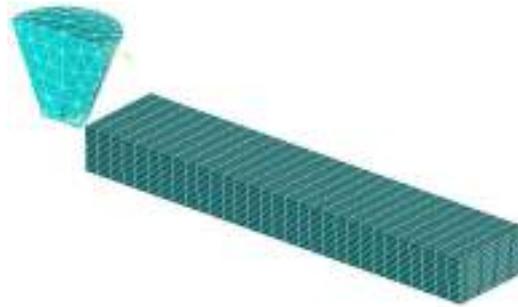


Рисунок 3.2.1 – Конечноэлементная модель абразивного зерна и заготовки

Шаг сетки зерна составлял 1 мкм. Для повышения точности расчета напряженно-деформированного состояния материала зерна, конус был разбит регулярной гексаэдрической сеткой.

В результате расчета удалось получить картины распределения всех компонентов тензоров напряжений и деформаций в зерне и заготовке, а также силы контактного взаимодействия между абразивным зерном и заготовкой. Результаты моделирования взаимодействия абразивного зерна с заготовкой, изготовленной из стали 45, с учетом различной площадки затупления на абразивном зерне, приведены на рисунке 3.2.2 и в таблице 3.2.3.

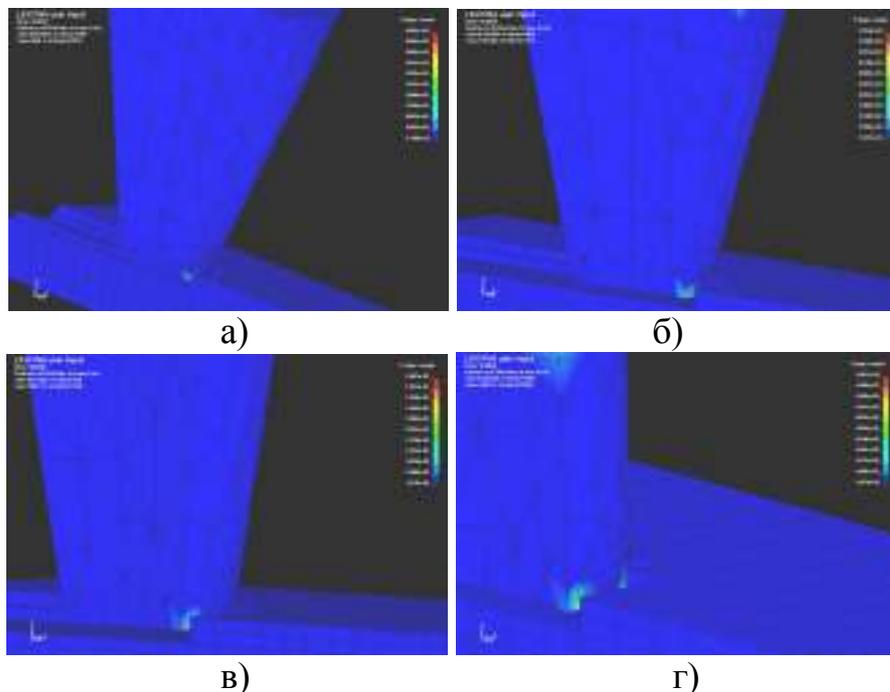


Рисунок 3.2.2 – Результаты моделирования контактного взаимодействия обрабатываемого и абразивного материала при температуре 200 °С для зернистостей: а) F90; б) F60; в) F54; г) F46

Таблица 3.2.3 – Величина напряжений в абразивном зерне

Температура, T_b , °C	Зерни- стость	Площадка затупления $l_{з.б}$, мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Величина напряжений σ , МПа							
200	F90	2097	913	1131	–	–	–	–	–
	F60	1944	887	677	809	1053	–	–	–
	F54	870	653	369	416	460	500	–	–
	F46	500	470	309	241	291	348	398	573
400	F90	1191	616	943	–	–	–	–	–
	F60	871	532	507	669	752	–	–	–
	F54	828	489	361	327	332	408	–	–
	F46	488	387	268	211	246	236	308	374
600	F90	1172	203	252	–	–	–	–	–
	F60	631	154	175	92	93	107	–	–
	F54	509	395	203	168	172	201	142	–
	F46	417	231	150	119	104	138	147	155
800	F90	404	89,3	76	–	–	–	–	–
	F60	388	67	47	42	38	49	–	–
	F54	290	201	45	32	28	46	57	–
	F46	246	177	88	27	23	46	59	67
1000	F90	177	49,7	72	–	–	–	–	–
	F60	155	39	30	30	30	28	–	–
	F54	110	52	36	24	20	39	35	–
	F46	109	41	24	19	29	34	55	63

Графическое представление данных таблицы 3.2.3 полиномиальными зависимостями второго порядка позволяет получить более ясную картину зависимости напряжений, действующих в теле абразивного зерна, от технологических условий операции шлифования (рисунок 3.2.3).

Анализируя приведенные зависимости можно заключить, что в начальный период работы зерна, когда оно имеет исходную остроту, напряжения в нем имеют существенную величину. Впоследствии образуется и начинает увеличиваться площадка затупления. Это приводит к снижению напряжения в абразивном материале, что соответствует периоду приработки и образованию на зерне «наилучшей», с точки зрения его напряженного состояния, величины площадки затупления, при которой напряжения в теле абразивного зерна минимальны. Дальнейший рост площадки затупления приводит к возрастанию напряжения в абразивном зерне, возможно за счет существенного увеличения трения по площадке затупления, тем более, когда величина площадки сопоставима с размерами самого зерна.

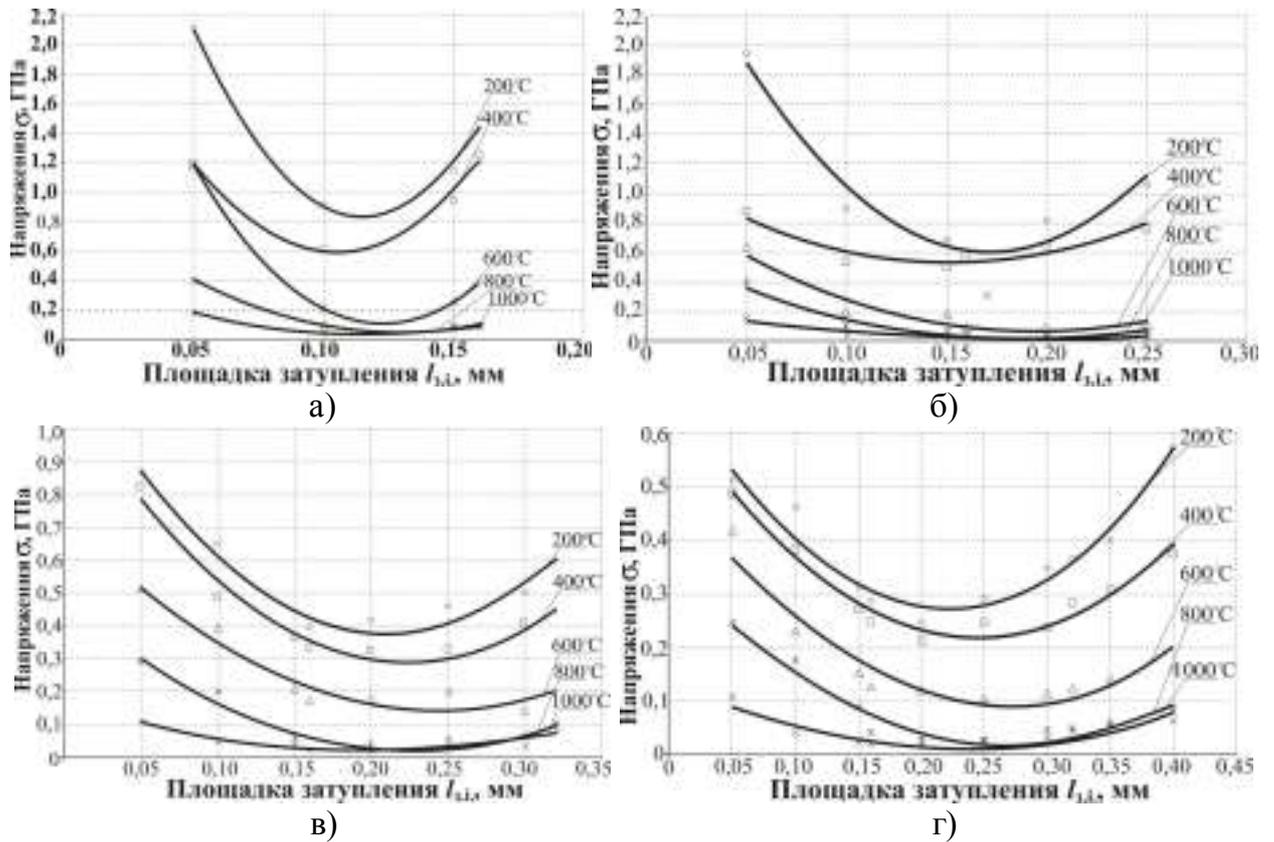


Рисунок 3.2.3 – Зависимость напряжений в абразивном зерне от величины площадки затупления, при различных температурах для зернистостей: а) F90; б) F60; в) F54; г) F46

Влияние зернистости абразивного зерна (его геометрических размеров) на величину напряжения в зерне также однозначно: с увеличением зернистости, при одинаковых температурах и величинах площадки затупления зерна меньшего размера испытывают большие напряжения. Это объясняется наличием в крупных зернах большего количества межатомных связей, воспринимающих внешнюю нагрузку.

Рост контактной температуры приводит к снижению напряжений в теле абразивного зерна: увеличение температуры в 2 или 3 раза приводит к снижению напряжений в 1,2 и 8 раз соответственно.

На данном этапе адекватность полученных результатов можно подтвердить косвенно (рисунок 3.2.4) – сравнением с данными по действительному сопротивлению сталей шлифованию, учитывающих температуру в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой [103, 105] и оказывающих прямое влияние на напряжения в теле абразивного зерна.

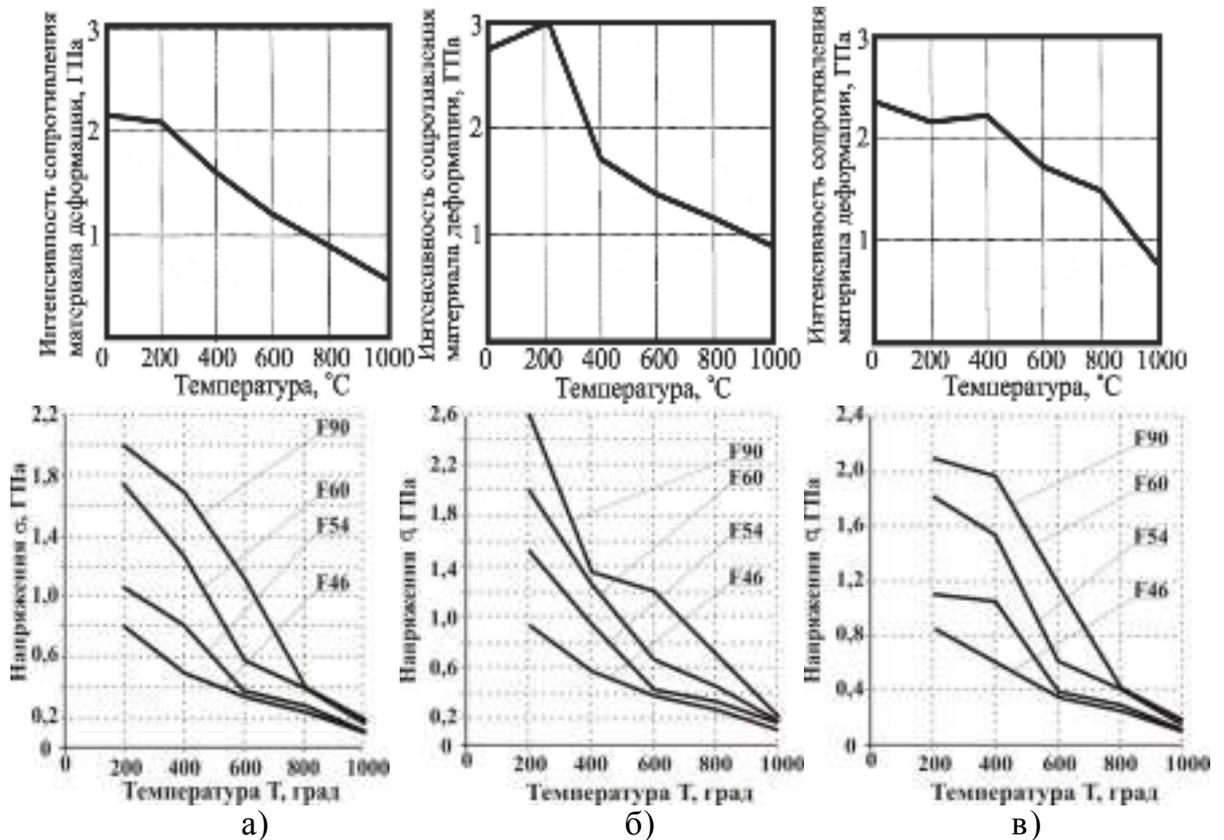


Рисунок 3.2.4 – Сопоставление расчетных данных (нижние графики) с данными А.А. Дьяконова [103, 105] (верхние графики), для различных зернистостей и сталей: а – 45; б – 40X; в – 40XH

Сопоставление расчетных данных с результатами исследований А.А. Дьяконова говорит о совпадении характера изменения зависимости напряжений, действующих в теле абразивного зерна, от температуры.

3.2.3. Долговечность абразивного зерна в различных технологических условиях

Для условий круглого наружного врезного шлифования стали 45, по формуле (3.2.4), для различных технологических условий (температур, зернистости и степени затупления зерна) была рассчитана долговечность $\tau_{ц}$ абразивного зерна. Результаты расчетов приведены в таблице 3.2.4 и на рисунке 3.2.5.

Влияние степени износа абразивного зерна на его долговечность однозначна. На зависимости можно выделить три основных участка: начальный период, когда с обрабатываемой заготовкой контактирует зерно с минимальной (исходной) площадкой затупления и на нем начинает образовываться площадка затупления, период стабильной работы, на котором площадка достигает своего опти-

мального значения, при котором долговечность абразивного зерна максимальная и период интенсивного износа зерна, при котором площадка увеличивается до размеров, сопоставимых с размерами самого зерна и происходит существенное уменьшение его долговечности.

Таблица 3.2.4 – Величина долговечности абразивного зерна в различных условиях

Температура, T_t , °C	Зерни- стость	Площадка затупления $l_{з.и}$, мм							
		0,005	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Долговечность $\tau_{ц}$, с							
200	F90	0,23	0,55	0,40	–	–	–	–	–
	F60	0,24	0,62	0,69	0,45	0,36	–	–	–
	F54	0,36	0,65	0,93	1,03	0,78	0,48	–	–
	F46	0,48	0,49	0,61	0,69	0,63	0,58	0,54	0,45
400	F90	0,37	0,67	0,55	–	–	–	–	–
	F60	0,43	0,91	0,99	0,63	0,42	–	–	–
	F54	0,44	0,93	1,24	1,65	1,30	0,92	–	–
	F46	0,58	0,65	0,79	0,90	0,83	0,84	0,73	0,66
600	F90	0,42	0,86	0,45	–	–	–	–	–
	F60	0,58	1,00	1,17	0,84	0,46	–	–	–
	F54	0,65	1,26	1,67	2,16	2,07	1,61	–	–
	F46	0,72	0,98	1,25	1,43	1,55	1,52	1,43	1,22
800	F90	0,81	1,62	1,18	–	–	–	–	–
	F60	0,83	1,27	1,54	1,36	1,10	–	–	–
	F54	0,97	1,50	1,92	2,25	2,03	1,64	–	–
	F46	1,06	1,60	2,46	3,20	3,37	3,06	2,42	1,70
1000	F90	1,42	2,57	0,78	–	–	–	–	–
	F60	1,54	2,21	2,46	1,93	1,27	–	–	–
	F54	1,56	2,00	2,49	2,61	1,99	1,66	–	–
	F46	1,90	3,11	3,66	3,86	3,66	3,31	2,74	2,09

Увеличение температуры в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом приводит к увеличению величины долговечности абразивного зерна, что связано со снижением прочностных свойств обрабатываемого материала (см. рисунок 3.2.4). Абразивные зерна больших размеров (зернистостей) обладают большей долговечностью, чем зерна меньших размеров, работающих в тех же технологических условиях. Так, увеличение размеров зерна с F90 до F46 увеличивает долговечность зерна примерно в 1,5 раза.

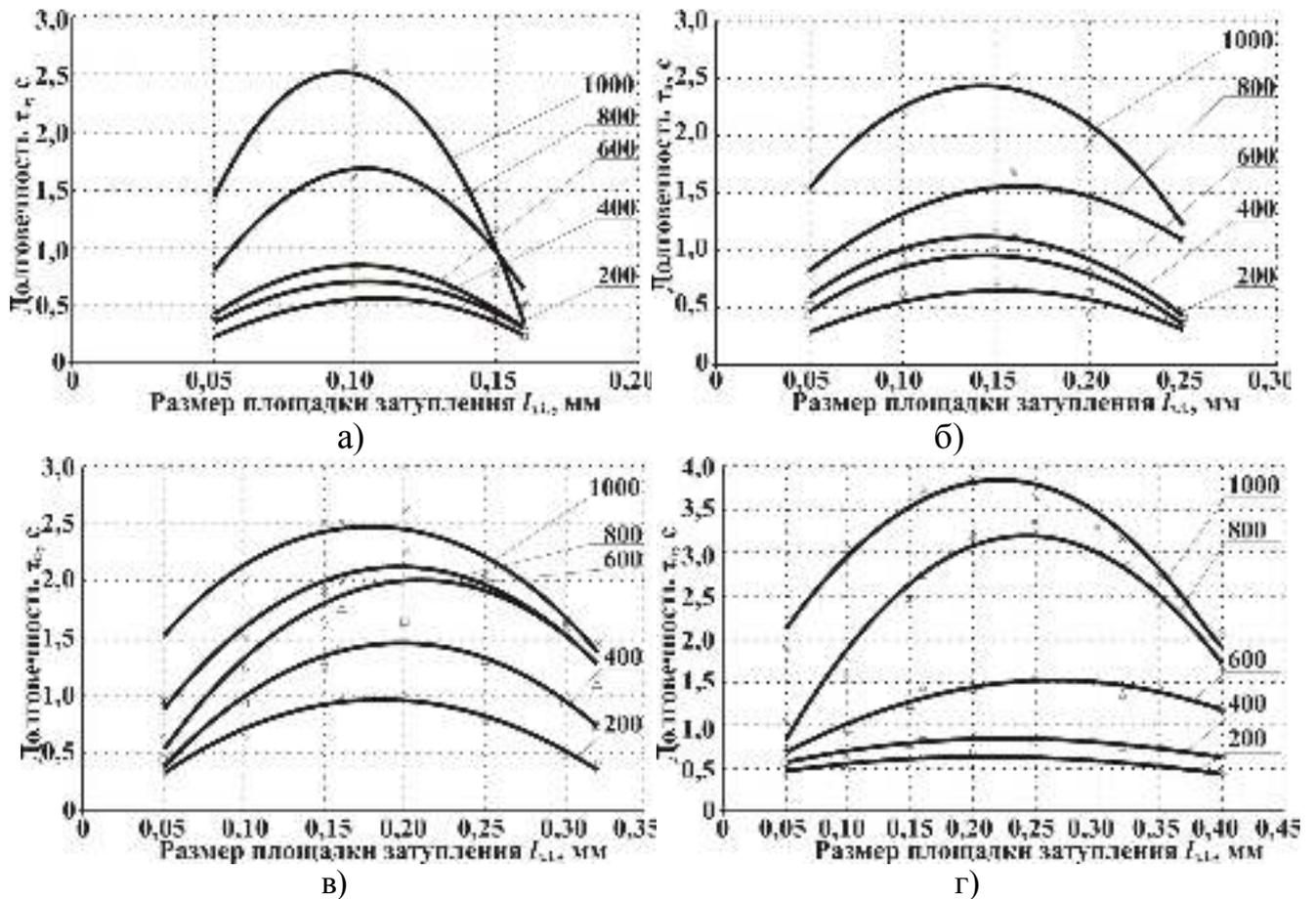


Рисунок 3.2.5 – Зависимость долговечности абразивного зерна от величины площадки затупления, при различных температурах для зернистостей: а) F90; б) F60; в) F54; г) F46

Абразивное зерно контактирует с обрабатываемой поверхностью площадкой затупления, обладающей субмикропрофилем, результатом чего является контакт по элементарным объемам площадки абразивного зерна. Согласно кинетической теории прочности [257], разрушение кристаллического тела, которым является абразивный материал, происходит следующим образом: напряжение единичных связей, имеющееся в результате действия внешних сил, снижает энергетический барьер для их разрыва, что, под действием тепловых флуктуаций увеличивает частоту разрывов межатомных связей. По границам зерен, связи которых испытывают напряжение, начинается скольжение и, как следствие по истечении времени, равному долговечности τ_c , зародышевая трещина, образовавшаяся в результате накопления межатомных разрывов, вырождается в локальную, приводящую к нарушению сплошности материала [257]. Следствием этих событий является отделение элементарного объема абразивного материала, в котором происходят разрушающие события, с рабочей поверхности абразивного зерна. Величина

долговечности $\tau_{ц}$, определенная по (3.2.4), представляет собой время от начала контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом до отделения элементарного объема абразивного зерна, испытывающего напряжения от взаимодействия с обрабатываемой заготовкой. В связи с этим следующей задачей настоящего исследования является определение величины микрообъема, отделяющегося по истечении периода долговечности, с поверхности абразивного зерна.

3.2.4. Прогнозирование массы абразивного зерна, изношенной в результате его механического износа

Определение величины объема элементарной части абразивного зерна, испытывающего напряжения σ , удаляемого по истечении периода долговечности $\tau_{ц}$, будет производиться средствами пакета Ansys, в котором выполнялось имитационное моделирование взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Для этого посредством команд, связанных с параметризацией модели, сначала визуализируется номер элемента, испытывающего максимальные напряжения (рисунок 3.2.6).

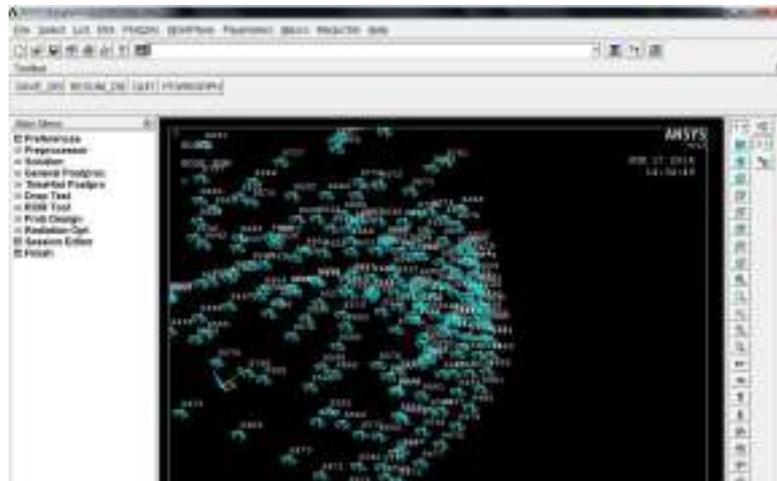


Рисунок 3.2.6 – Визуализация номера элемента

В дальнейшем, командой «Get scalar data», указав предварительно в качестве одного из параметров «Elements volume», а также номер требуемого элемента, формируется файл, в котором записаны требуемые параметры модели, в том числе и величина объема требуемого элемента в мм^3 (рисунок 3.2.7).



Рисунок 3.2.7 – Файл параметров модели

Параметры твердотельной модели абразивного зерна одинаковые для всех технологических условий работы: обрабатываемые материалы, температуры в зоне контакта, материал зерна. Значит, полученные данные можно использовать для различных сочетаний «абразивное зерно – обрабатываемый материал».

Задаваясь значением времени работы круга, например $T=30$ с, по формуле (3.2.6), можно рассчитать массу абразивного материала, изношенного с абразивного зерна в результате его механического взаимодействия с обрабатываемым материалом (таблица 3.2.5, рисунок 3.2.8).

Таблица 3.2.5 – Масса части абразивного зерна, изношенной в результате его механического взаимодействия с заготовкой (сталь 45)

Температура, $T_b, ^\circ\text{C}$	Зернистость	Площадка затупления $l_{3,i}, \text{мм}$									
		0,005	0,10	0,15	0,16	0,20	0,25	0,30	0,32	0,35	0,40
		Масса изношенной части абразивного зерна $M_{a.z.}^M, 10^{-7}, \text{г}$									
200	F90	5,54	6,12	9,49	31,45	–	–	–	–	–	–
	F60	4,42	4,53	4,55	8,68	23,19	30,63	–	–	–	–
	F54	2,01	2,64	2,97	4,55	7,90	11,16	19,92	26,66	–	–
	F46	0,99	2,15	2,92	3,58	7,62	8,99	12,47	13,20	15,29	21,62
400	F90	4,19	5,04	8,36	29,09	–	–	–	–	–	–
	F60	2,47	3,08	3,16	5,98	16,44	26,61	–	–	–	–
	F54	1,64	1,75	2,22	3,21	4,93	6,68	10,35	15,31	–	–
	F46	0,81	1,62	2,26	2,52	5,91	6,85	8,50	9,73	11,17	14,52
600	F90	3,03	3,93	6,81	20,41	–	–	–	–	–	–
	F60	1,84	2,12	2,67	5,15	12,40	24,45	–	–	–	–
	F54	1,12	1,30	1,64	2,56	3,77	4,21	5,94	10,10	–	–
	F46	0,66	1,08	1,43	2,01	3,70	3,65	4,71	5,37	5,75	7,88
800	F90	1,58	2,09	5,18	13,76	–	–	–	–	–	–
	F60	1,28	2,21	2,73	3,45	7,68	10,12	–	–	–	–
	F54	0,75	1,09	1,43	2,26	3,62	4,29	5,82	9,78	–	–
	F46	0,44	0,66	0,73	1,07	1,65	1,68	2,34	2,60	3,39	5,69
1000	F90	0,91	1,32	4,85	13,37	–	–	–	–	–	–
	F60	0,69	1,27	1,69	2,29	5,40	8,78	–	–	–	–
	F54	0,47	0,81	1,10	1,80	3,11	4,38	5,75	7,80	–	–
	F46	0,25	0,34	0,49	0,79	1,37	1,55	2,16	2,33	2,99	4,62

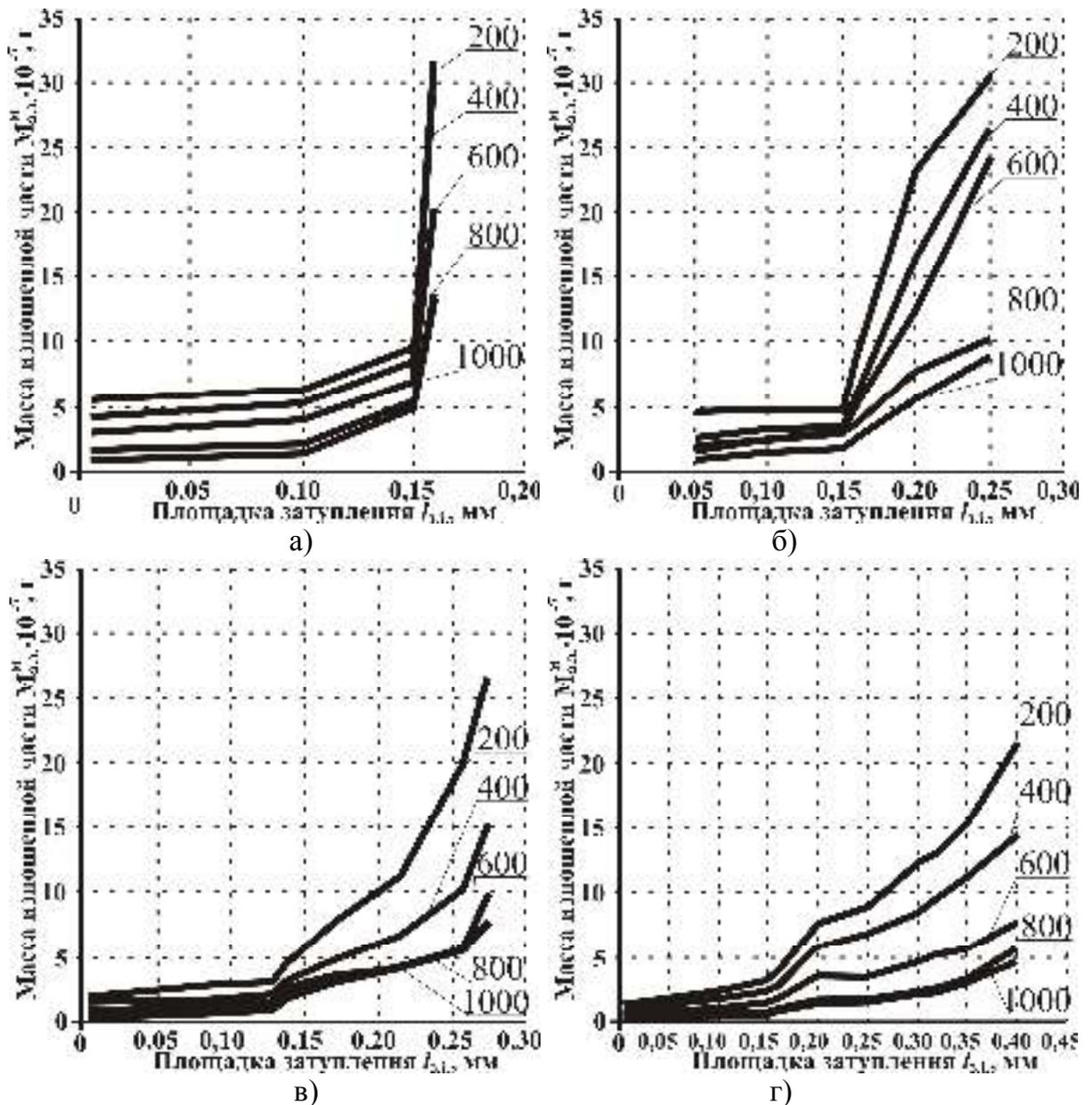


Рисунок 3.2.8 – Зависимость величины массы изношенной части абразивного зерна в результате его механического взаимодействия со сталью 45, от величины площадки затупления, при различных температурах для зернистостей:

а) F90; б) F60; в) F54; г) F46

Проанализируем влияние всех параметров, включенных в модель механического износа абразивного зерна на его величину.

В пределах одного уровня температуры и зернистости влияние размера площадки затупления на величину изношенной части прямопропорциональное, что вполне закономерно: увеличение размера площадки приводит к повышению размеров поверхностей трения абразивного зерна с обрабатываемым материалом, увеличению сил трения, повышению напряжений, действующих в теле абразивного зерна и возрастанию объемов изношенной части абразивного материала.

Увеличение температуры для одной зернистости и величины площадки затупления уменьшает объем изношенного абразивного материала. Это объясняется тем, что с повышением температуры в зоне контакта абразивного зерна и обрабатываемого материала существенно снижается температурно-прочностная характеристика материала [103, 105], что понижает напряжения, действующие в элементарном объеме абразивного материала и, как следствие, уменьшается его износ.

Размер абразивного зерна, контактирующего с обрабатываемым материалом, оказывает существенное влияние на величину напряжений, возникающих в абразивном зерне, и определяет его долговечность. Следовательно, чем больше размеры абразивного зерна, тем меньше напряжения, приходящиеся на единичную связь, а значит больше его долговечность. При увеличении зернистости (увеличении размеров зерна) происходит соответственно и уменьшение объема изношенного абразивного материала.

Определим массу изношенной части абразивного зерна для различных периодов времени работы ШК, с учетом того, что начальная площадка затупления равна радиусу округления острого абразивного зерна (таблица 3.2.6 и рисунок 3.2.9).

Таблица 3.2.6 – Масса части абразивного зерна, изношенной в результате его механического взаимодействия с заготовкой (F46, материал заготовки – сталь 45)

Температура, °C	Время работы ШК T, мин							
	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
	Масса $M_{a.з.}^M$ изношенной части зерна, г, 10^{-7}							
200	0,20	0,99	1,97	3,95	5,92	7,89	9,86	11,84
400	0,16	0,81	1,63	3,25	4,88	6,51	8,14	9,76
600	0,13	0,66	1,31	2,62	3,94	5,25	6,56	7,87
800	0,09	0,44	0,89	1,78	2,66	3,55	4,44	5,33
1000	0,05	0,25	0,50	0,99	1,49	1,98	2,48	2,98

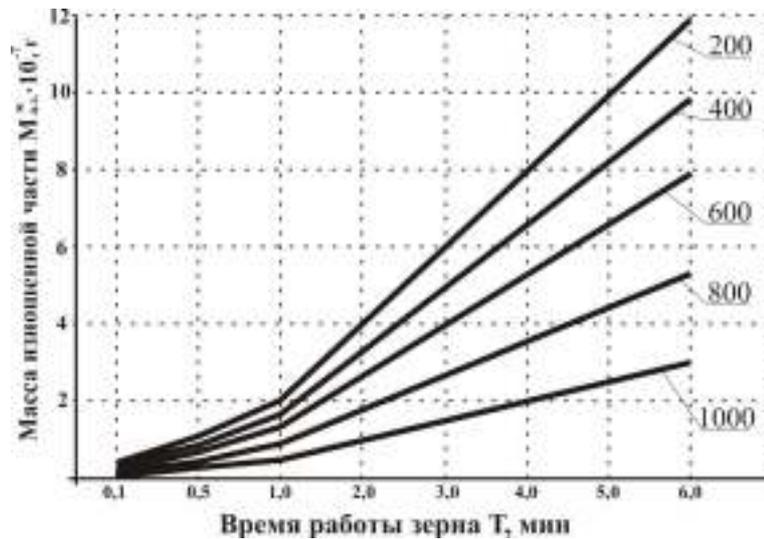


Рисунок 3.2.9 – Зависимость величины массы изношенной части абразивного зерна в результате его механического взаимодействия со сталью 45, от времени контакта, для различных температур

Зависимости, показанные на рисунке 3.2.9, говорят об однозначном влиянии изменения температуры на величину изношенной части абразивного зерна в результате его механического взаимодействия с обрабатываемым материалом: увеличение температуры приводит к уменьшению объема изношенной части зерна. Это обстоятельство хорошо согласуется с данными А.А. Дьяконова [103, 105], в соответствии с которыми с увеличением температуры в зоне обработки значение температурно-прочностной характеристики обрабатываемого материала снижается. Кроме этого, увеличение времени работы зерна приводит к возрастанию величины объема изношенной части.

Указанные тенденции характерны для различной зернистости при постоянной температуре (600 °C) для одной марки обрабатываемого материала (сталь 45, 42...45 HRC) (рисунок 3.2.10). Повышенный износ зерна малого размера, в сравнении с другими зернистостями, объясняется меньшей величиной его долговечности, что обусловлено меньшим количеством межатомных связей в абразивном материале, воспринимающих нагрузку в процессе контакта единичного зерна с обрабатываемым материалом.

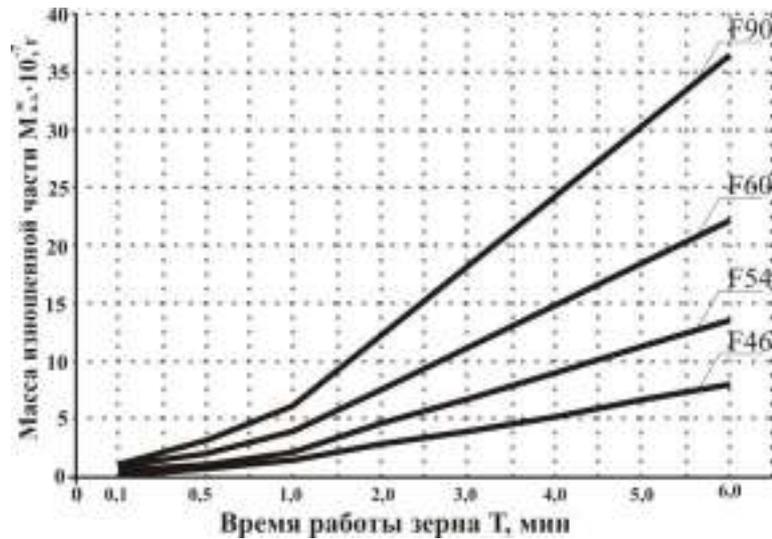


Рисунок 3.2.10 – Зависимость величины массы изношенной части абразивного зерна в результате его механического взаимодействия со сталью 45, от времени контакта для различных зернистостей

3.3. Физико-химический износ абразивного зерна

3.3.1. Общий вид формулы для определения величины износа

Для определения величины части абразивного зерна, изношенной в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом, принимаем формулу, полученную Г.Н. Лоладзе [178] и рассмотренную в п. 1.6.2. С учетом формулы Е.Н. Маслова [182] для определения длины дуги контакта получаем

$$M_{\text{а.з.}}^{\text{ф-х}} = 0,08G \frac{M_m}{m} C_0 l_3^{3/2} D^{1/2} V_k^{1/2} \frac{T}{D_k} \left(1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \frac{n_3}{V_{\text{спад}}}}{D_k + d_3}} \quad (3.3.1)$$

Поскольку в настоящем исследовании принимается допущение, что количество атомов в объеме третьего вещества, образованного в результате физико-химических процессов в зоне резания равно количеству атомов растворителя [178], то параметр G принимается равным плотности обрабатываемого материала. Согласно периодической таблице Д.И. Менделеева для электрокорунда параметр $M_m=101,96$ а.е.м. Расчеты будем вести для следующих неизменяемых параметров: $V_k=50$ м/с; $D_k=600$ мм; $v_3=30$ м/мин; $v_{\text{спад}}=0,5$ мм/мин; $d_3=80$ мм. Переменными параметрами являются T и $l_{3,i}$: величина площадки затупления рассчитывается за каждый временной интервал, который может задаваться любым.

Неизвестными являются параметры C_0 – коэффициент предельной растворимости электрокорунда в обрабатываемом материале, а также D_{cp} – коэффициент сродства указанных материалов.

3.3.2. Методика определения коэффициента предельной растворимости

В зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом имеет место гетеродиффузия (растворение материалов друг в друге) или реактивная диффузия, результатом которой является образование третьего вещества. При этом образуются соединения, типа герцинит, муллит и т.д. [6, 50, 70, 96, 325 и др.]. Длительность реакции определяется временем контакта абразивного и обрабатываемого материалов.

Анализ литературных источников позволил установить ориентировочные диапазоны значений параметра предельной растворимости для некоторых обрабатываемых материалов [36, 55, 94, 180, 193, 323]. В остальных случаях значения коэффициента C_0 , определялись из пропорции

$$C_0 = \frac{x_1 \cdot m}{x_2 \cdot M_m + x_1 \cdot m}, \quad (3.3.2)$$

где x_1 и x_2 – стехиометрические коэффициенты в соответствующих уравнениях химических реакций.

Результаты приведены в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Величина коэффициента предельной растворимости абразивного материала в обрабатываемом

Марка обрабатываемого материала	Соединение, вступающее в реакцию (растворитель)	Уравнение реакции	Величина параметра уравнения (3.3.1)		
			$G, \text{г/см}^3$	m	C_0
45	FeO	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} \rightarrow \rightarrow \text{FeOAl}_2\text{O}_3$	7,8	71,85	0,013
40X			7,7	152,02	
40XH					
60СГ2	SiO ₂	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	7,81	70,94	0,28
BT-15	TiO ₂	$\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \rightarrow \text{TiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$	4,5	63,9	0,26
СЧ-20	C	$9\text{C} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \rightarrow \text{Al}_4\text{C}_3 + 6\text{CO}$	2,25	12,0	0,31

3.3.3. Методика определения коэффициента сродства абразивного и обрабатываемого материала

Сложность теоретического определения параметра $D_{\text{ср}}$ – коэффициента сродства, заключается в том, что весьма затруднительно учесть все многообразие сталей и сплавов различного химсостава, обрабатываемых шлифованием. Поскольку данный параметр является интегральной характеристикой интенсивности протекания физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов и сведения о значении данного параметра в научно-технической литературе не обнаружены, необходимо разработать специальную методику определения коэффициента $D_{\text{ср}}$.

Методика заключается в следующем. Образцы абразивного материала (электрокорунда белого) вводились в контакт с заготовками, изготовленными из различных марок сталей и сплавов. Полученные образцы помещались в печь, нагревались до определенной температуры, выдерживались заданное время (рисунок 3.3.1) и исследовались под микроскопом. Подробное описание аппаратной и методической базы, а также результаты исследования приведены в Приложении А.

Первичный анализ полученных образцов показал следующее (рисунок 3.3.2). На границе раздела материалов в результате их физико-химического взаимодействия образовалось третье вещество. На некоторых образцах эта прослойка четко видна (см. рисунок 3.3.2, а–в), на некоторых визуально не обнаруживается (см. рисунок 3.3.2, г).



Рисунок 3.3.1 – Образцы после нагрева

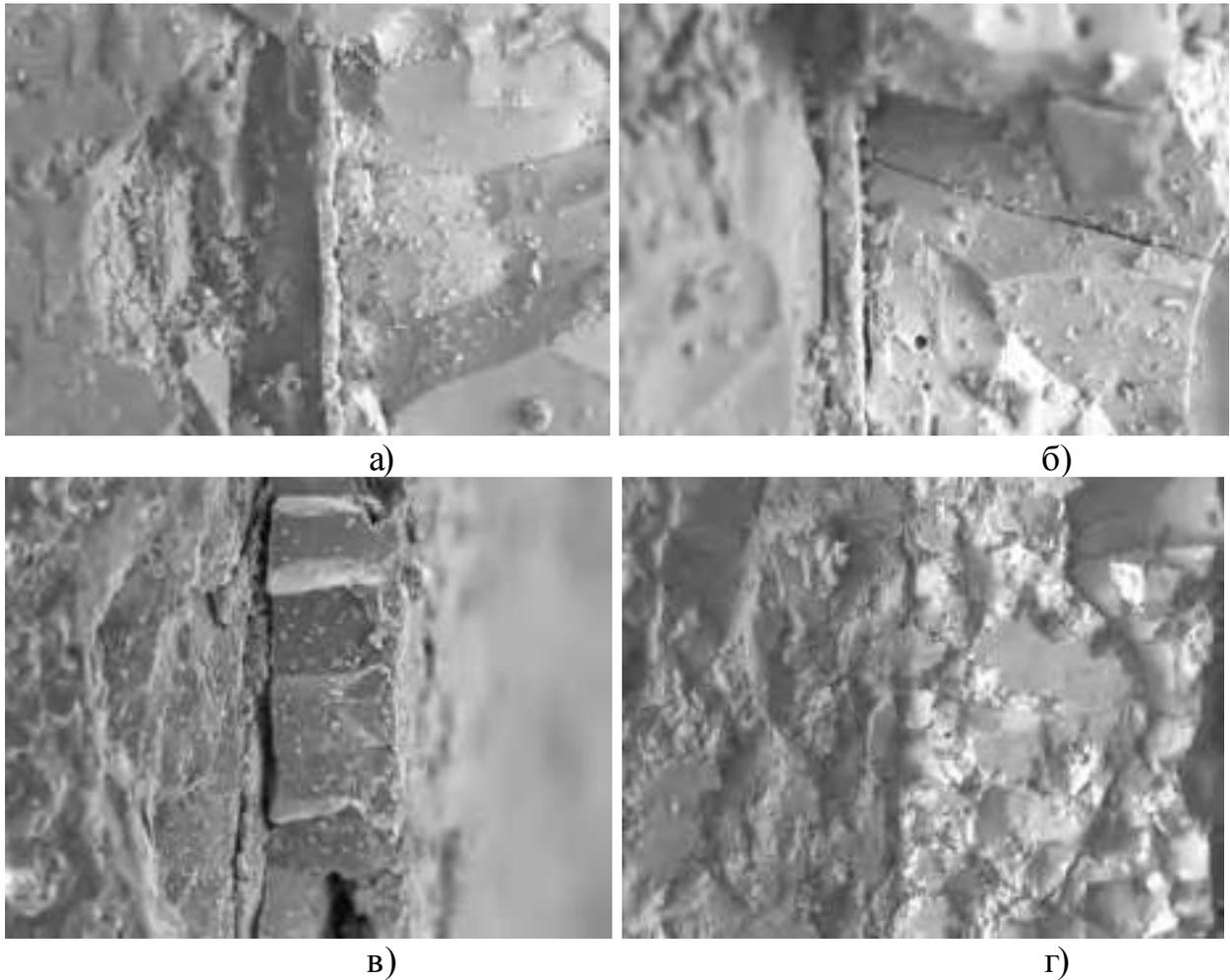


Рисунок 3.3.2 – Исследуемые исходные образцы ($\times 800$):
а) сплав ВТ-15, б) сталь 60Г; в) сталь 38ХС, г) сталь 45

Затем изготавливались поперечные шлифы образцов, на которые напылялось платиновое покрытие и шлифы исследовались под электронным микроскопом (рисунок 3.3.3). Каждый образец подвергался качественному и количественному химическому анализу перпендикулярно линии раздела материалов.



Рисунок 3.3.3 – Образцы с напылением перед исследованием под микроскопом
Результаты анализа шлифов приведены на рисунке 3.3.4.

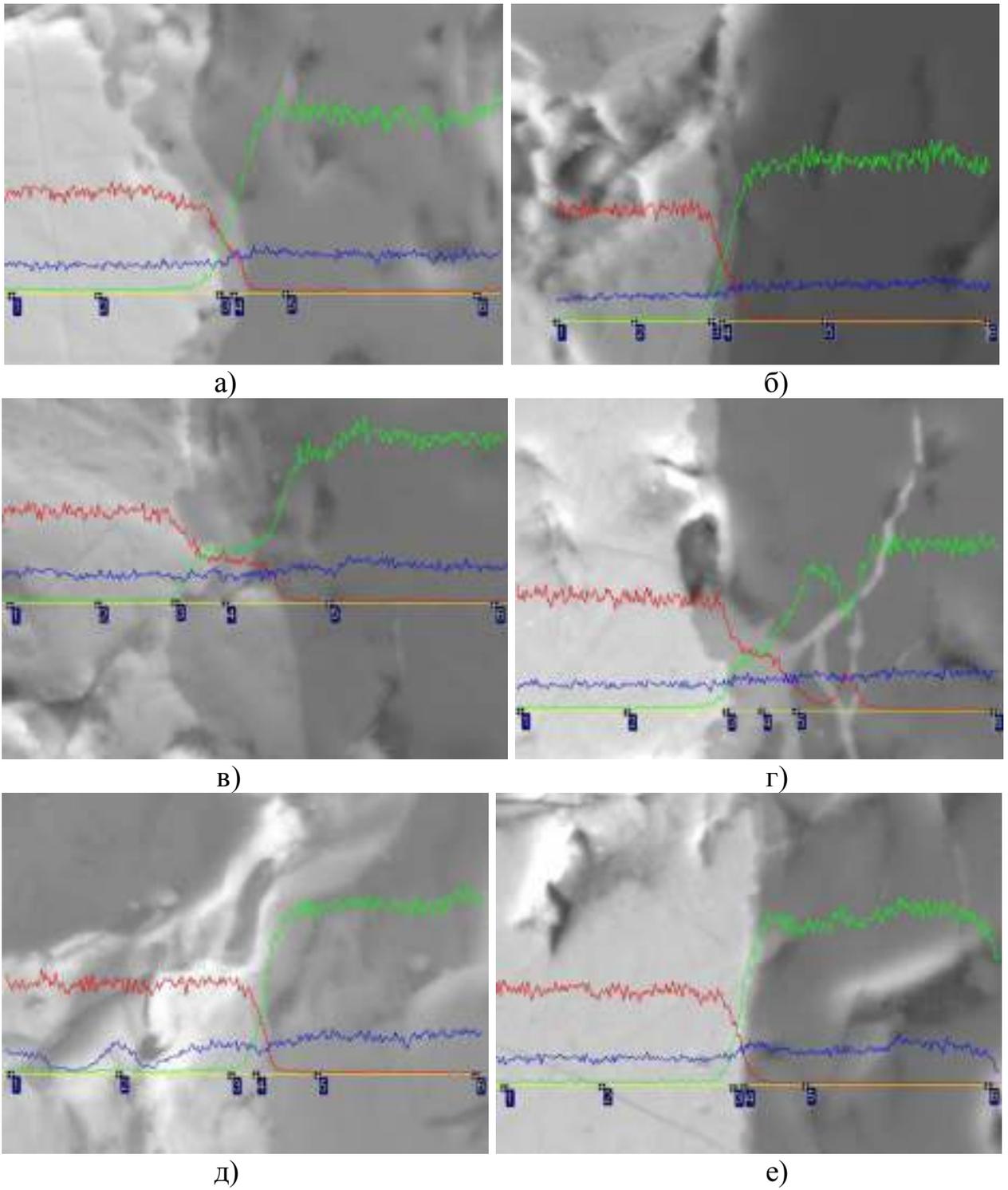
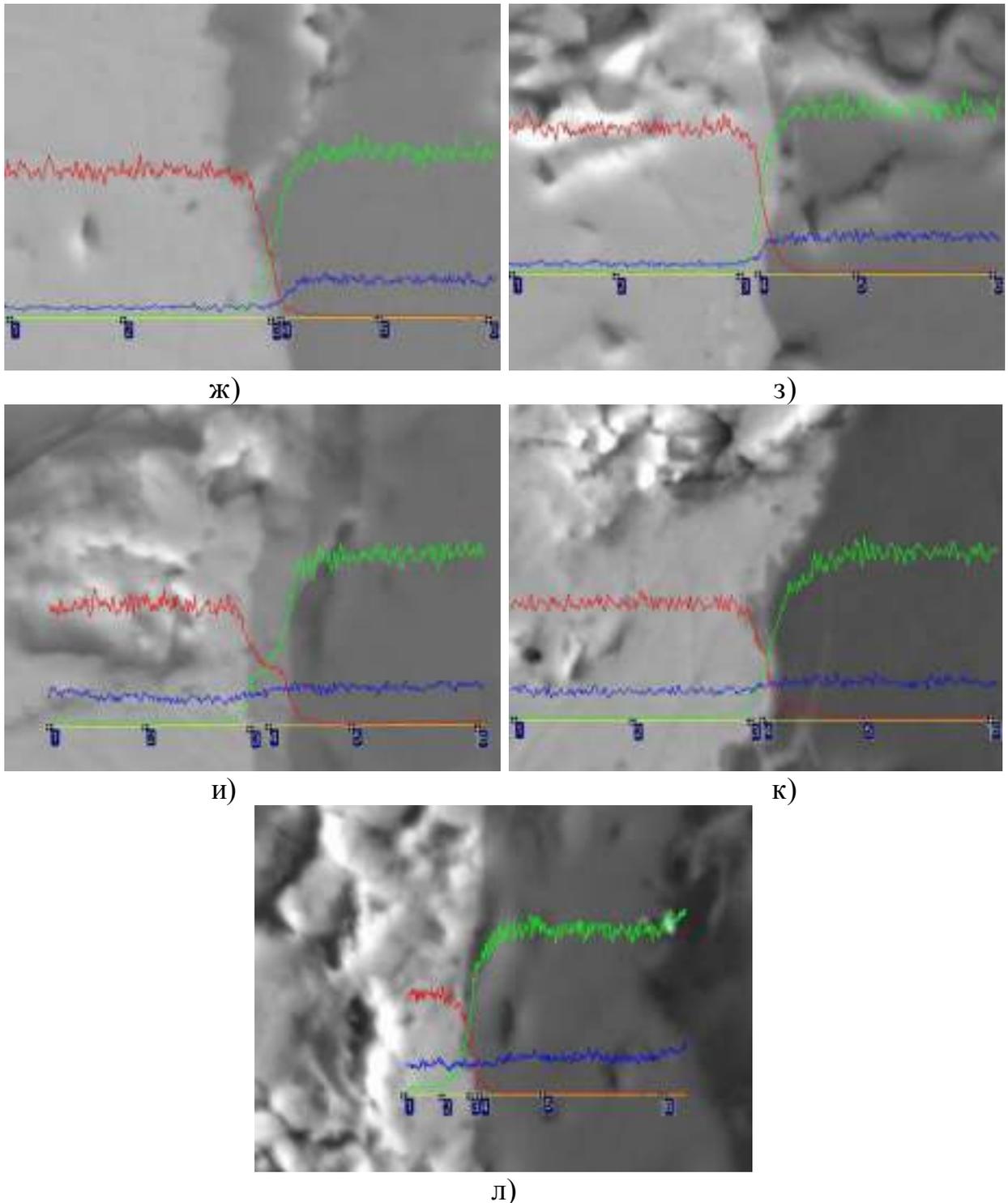


Рисунок 3.3.4 – Химический анализ шлифов:
 а) VT-15; б) 38ХС; в) 60Г; г) 38ХГН; д) 40Х; е) 40ХН;
 — титан (а), железо (б, в, г, д, е),
 — алюминий; — кислород



ж)

з)

и)

к)

л)

Окончание рисунка 3.3.4:

ж) 40ХН3А; з) 45; и) ОТ-3; к) СЧ-20; л) 40Х13

— железо (ж, з, к, л), титан (и);

— алюминий; — кислород

Характерной особенностью для всех исследуемых образцов является наличие серой зоны – вещества, образовавшегося в результате взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов. Особенно эта зона выражена на образцах из сплава ВТ-15, сталей 38ХС и 60Г (см. рисунок 3.3.4).

Количественные характеристики концентраций основных химических элементов контактируемых соединений были получены с помощью точечного химического анализа в наиболее характерных точках образцов: по краям шлифа (примерно на расстоянии 10 мкм в каждую сторону от пограничной зоны) – точки 1 и 6, в равноудаленных от серой зоны точках – точки 3 и 5, в середине серой зоны – точка 4, по границам серой зоны – точки 3 и 5. Результаты приведены в таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2 – Результаты точечного химического анализа для различных пар «обрабатываемый–абразивный материал»

Марка стали	Химический элемент	№ точки					
		1	2	3	4	5	6
		Концентрация элемента, %					
20	Fe	87,69	83,54	79,36	41,56	4,15	1,09
	Al	0,56	0,87	4,06	41,18	56,07	58,19
	O ₂	18,63	21,69	25,78	34,88	45,97	49,03
45	Fe	81,97	81,76	77,64	34,89	1,03	0,54
	Al	0,49	0,57	2,59	32,71	55,23	55,73
	O ₂	17,54	17,67	19,77	32,40	43,74	43,73
40X	Fe	80,55	79,39	72,19	45,46	4,25	0,90
	Al	0,46	0,87	2,44	25,16	49,92	50,79
	O ₂	18,49	19,24	21,23	27,69	45,83	48,31
40XH	Fe	79,22	80,99	78,52	45,71	1,26	0,73
	Al	0,54	0,60	2,34	26,87	54,31	55,57
	O ₂	19,14	18,47	20,18	27,42	44,43	43,70
38XГН	Fe	79,41	79,37	77,40	43,25	5,58	0,68
	Al	0,51	0,66	1,93	24,37	47,7	51,39
	O ₂	19,28	19,22	19,74	31,36	46,73	47,93
12XНЗА	Fe	81,83	82,23	76,28	24,01	1,34	0,53
	Al	0,62	0,62	3,96	47,47	57,34	56,51
	O ₂	17,55	17,15	19,75	28,52	41,32	42,96
38XC	Fe	81,63	81,06	79,89	32,47	1,64	0,68
	Al	0,47	0,67	1,16	35,16	54,51	55,72
	O ₂	17,90	18,27	18,95	32,37	43,85	43,61
BT-15	Ti	59,89	57,07	44,16	30,50	0,90	0,06
	Al	0,02	0,87	15,66	20,96	49,19	50,37
	O ₂	40,11	38,84	40,18	47,59	49,91	49,27
OT-3	Ti	61,27	59,71	47,21	32,68	7,70	0,00
	Al	0,09	0,77	12,63	19,66	39,39	49,75
	O ₂	38,24	39,52	40,16	47,26	49,61	50,25
У8А	Fe	80,25	79,68	61,78	42,23	1,07	0,80
	Al	0,62	0,62	14,28	27,25	50,96	50,32
	O ₂	19,13	19,69	22,19	30,52	47,97	48,88
ШХ-15	Fe	77,77	78,33	62,02	52,63	1,43	0,95
	Al	0,57	0,50	9,89	18,73	48,59	51,05
	O ₂	21,66	21,17	24,58	28,64	49,98	48,00
12X18H10T	Fe	79,56	75,37	41,09	36,59	23,77	1,39
	Al	0,58	2,04	18,09	32,71	40,81	51,71
	O ₂	18,59	21,78	25,63	30,06	38,17	46,90

В качестве анализируемых химических элементов для всех образцов был принят алюминий, для железоуглеродистых сплавов – железо, для титановых – титан. Химический анализ для каждого образца повторялся три раза, в различных местах шлифа. Затем рассчитывались средние численные характеристики точечного химического анализа. Выполненный точечный химический анализ различных образцов показал, что в направлении «от краев образца к границе раздела материалов» наблюдается уменьшение концентрации соответствующего химического элемента – алюминия и железа или титана. Характерными точками являются 1 и 6: в этих крайних точках значения концентраций алюминия в стали и железа (титана) в электрокорунде минимальны. Учитывая четкую выраженность образовавшегося третьего вещества, интенсивность взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала достаточно высока.

Как уже отмечалось, одним из наиболее важных факторов, отличающих шлифование от других методов механической обработки, является кратковременность контакта отдельного абразивного зерна с обрабатываемым материалом (порядка 2×10^{-3} с). Однако именно этот факт в значительной степени повышает вероятность протекания диффузионных и реакционных процессов в зоне шлифования: наибольшая скорость взаимного растворения контактирующих веществ наблюдается при значительном сокращении времени их контакта. Это объясняется прежде всего, значительным градиентом концентраций контактирующих веществ друг в друге: в электрокорунде отсутствует железо (либо другой основной элемент), а в обрабатываемых материалах нет алюминия.

Многочисленными исследованиями доказано, что рост толщины x диффузионной прослойки как при гетеро-, так и при реактивной диффузии протекает по параболическому закону [298, 305]:

$$x = 4 \sqrt{\frac{D \cdot T_d}{\pi}}, \quad (3.3.3)$$

где T_d – время диффузии.

Выражение (3.3.3) называется параболическим законом диффузии и может быть получено теоретическими путем из закона диффузии Фика [298, 305].

Физико-химические процессы, протекающие между абразивным и обрабатываемым материалом, не ограничиваются взаимодействием конкретных химических элементов (например, железа и алюминия). Они представляют собой более сложные химические взаимодействия, обусловленные наличием и концентрациями легирующих элементов в обрабатываемом материале. Таким образом, в случае использования формулы (3.3.3) применительно к настоящему исследованию коэффициент диффузии D представляет собой обобщенный коэффициент сродства $D_{\text{ср}}$ конкретного обрабатываемого материала к абразивному. Физический смысл коэффициента сродства аналогичен смыслу коэффициента диффузии: это коэффициент пропорциональности, характеризующий диффузионный поток между материалами при градиенте их концентраций на границе контакта. Выражая из формулы (3.3.3) коэффициент сродства $D_{\text{ср}}$ через толщину диффузионной прослойки и время контакта получаем формулу для определения коэффициента сродства абразивного и обрабатываемого материала:

$$D_{\text{ср}} = \frac{x^2 \pi}{16 \cdot T_{\text{д}}} \quad (3.3.4)$$

Серия экспериментов была проведена для различных температур (200–1000 °С) с шагом 200 °С для номенклатуры материалов – представителей различных групп обрабатываемости [258]. При этом материалы подбирались таким образом, чтобы была возможность установить влияние конкретного химического элемента на величину коэффициента сродства. Толщина диффузионной зоны определялась в нескольких местах, перпендикулярно линии раздела веществ. Толщина измерялась по химическому спектру, полученному при химическом анализе образцов. Результаты представлены в таблице А.3, Приложения А. Графические зависимости показаны на рисунке 3.3.5.

Повышение температуры в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой приводит к повышению интенсивности физико-химического взаимодействия между материалами. Следовательно, в суммарном объеме изношенной части абразива увеличивается доля данного механизма износа.

Расчитанные коэффициенты сродства различных материалов к электрокорунду позволяют учесть столь значимый механизм износа абразивных зерен при шлифовании, как физико-химический, при построении обобщающей модели износа ШК при обработке различных марок сталей и сплавов. Наибольшей ценностью обладают эмпирические данные для материалов, отличающихся концентрацией конкретного элемента в химическом составе.

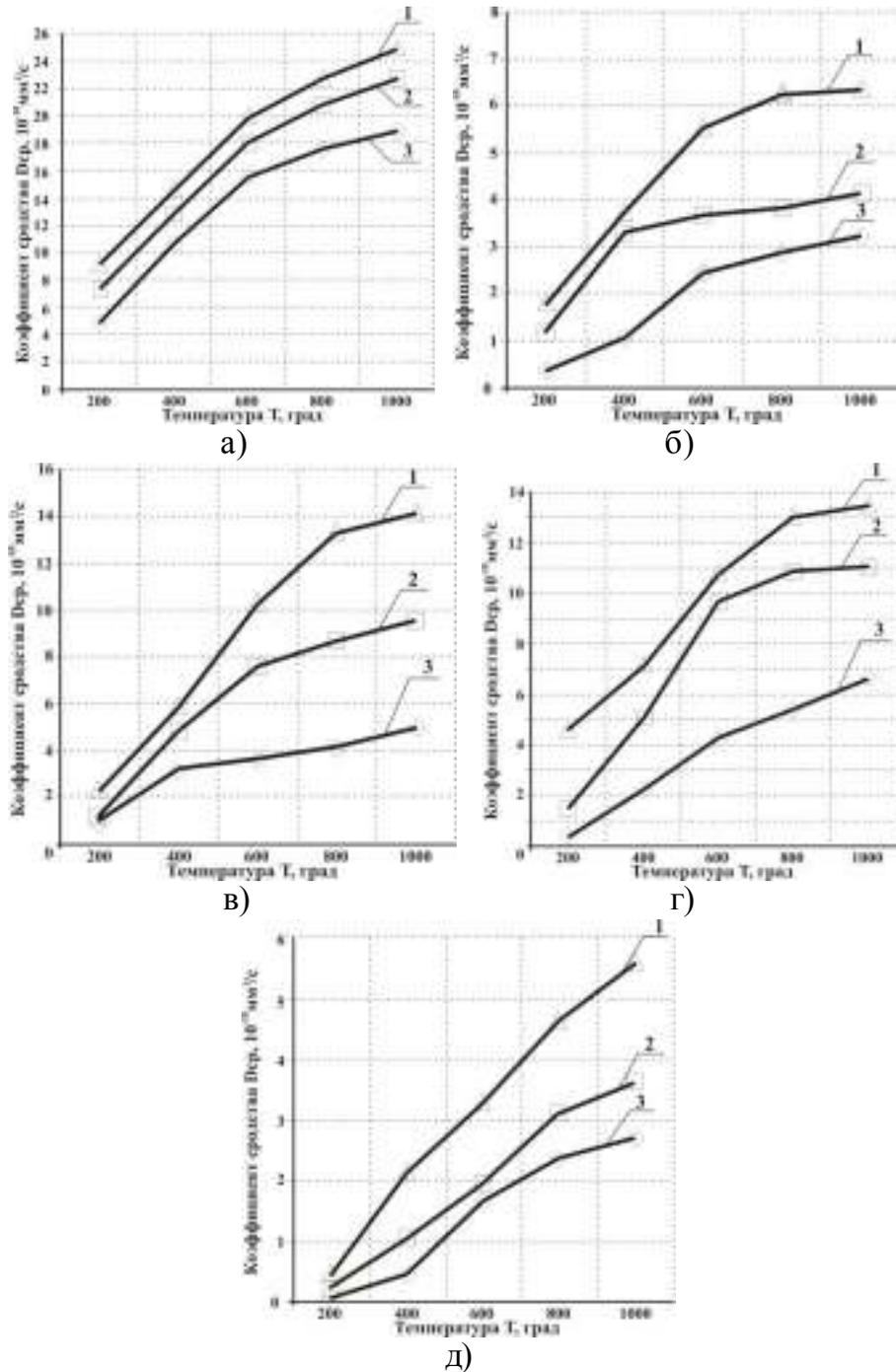


Рисунок 3.3.5 – Зависимость коэффициента сродства различных сталей от температуры: сталь а) 1 – 20, 2 – 30, 3 – 40; б) 1 – 20X, 2 – 30X, 3 – 40X; в) 1 – 20X13, 2 – 30X13, 3 – 40X13; г) 1 – 20XH, 2 – 30XH, 3 – 40XH; д) 1 – 20XH3A, 2 – 30XH3A, 3 – 40XH3A.

3.3.4. Исследование влияния химсостава обрабатываемого материала на интенсивность физико-химического износа абразивного зерна

Выполненный комплекс экспериментальных исследований по определению величины коэффициента сродства абразивного и обрабатываемого материала позволяет оценить влияние химического состава шлифуемого материала на интенсивность протекания физико-химического взаимодействия (рисунки 3.3.5, 3.3.6) при различных температурах в зоне шлифования.

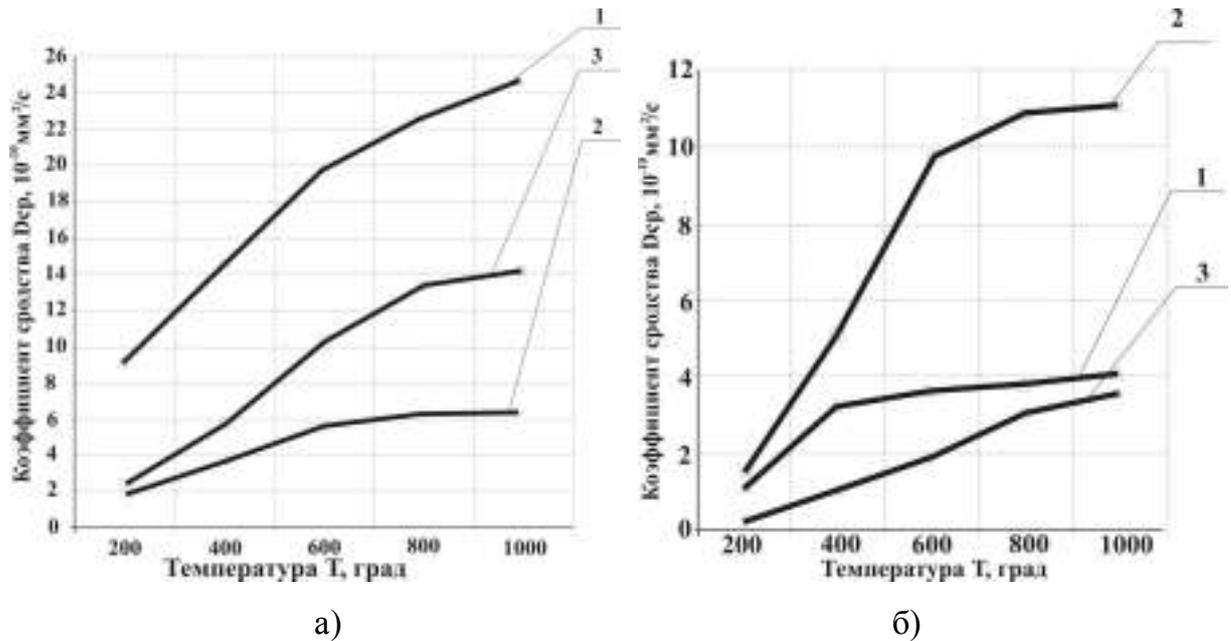


Рисунок 3.3.6 – Зависимость коэффициента химического сродства различных сталей от температуры: а) 1 – сталь 20, 2 – 20X, 3 – 20X13; б) 1 – 30X, 2 – 30XH, 3 – 30XH3A

Полученные эмпирические данные позволяют качественно и количественно оценить влияние различных химических элементов – углерода, хрома, никеля и титана на коэффициент сродства. Для анализа степени влияния каждого химического элемента, входящего в состав шлифуемого материала, преобразуем полученные данные, выделив марки материалов, отличающиеся друг от друга концентрацией конкретных химических элементов. В таблице 3.3.3 приведены данные, полученные для температуры 600 °С. На рисунке 3.3.7 приведены зависимости влияния концентрации углерода (а, д), хрома (б), никеля (в) и титана (г) на величину коэффициента сродства.

Таблица 3.3.3 – Коэффициент сродства для материалов, отличающихся концентрацией различных химических элементов (для температуры 600 °С)

Марка стали	Химический элемент	Содержание элемента, %, до	Коэффициент сродства $D_{ср}^{10}$, мм ² /с, 10^{-10} (10^{-7})
20	Углерод	0,2	19,88
30		0,3	18,02
40		0,4	15,58
20	Хром	0,25	19,88
20Х		1,00	8,28
20Х13		13,00	10,22
20Х	Никель	0,30	8,28
20ХН		1,00	10,75
20ХН3А		3,00	3,26
30	Хром	0,25	18,02
30Х		1,00	3,67
30Х13		13,00	7,57
30Х	Никель	0,30	3,67
30ХН		1,00	9,68
30ХН3А		3,00	1,93
40	Хром	0,25	15,58
40Х		1,00	2,43
40Х13		13,00	3,65
40Х	Никель	0,30	2,43
40ХН		1,00	4,29
40ХН3А		3,00	1,69
BT-3	Титан	85	(12,82)
BT-5		90	(13,36)
BT-15		95	(17,24)
20Г	Углерод	0,20	(11,05)
40Г		0,40	(9,99)
60Г		0,60	(7,86)

Полученные данные позволяют оценить влияние основных химических элементов на интенсивность протекания физико-химического взаимодействия обрабатываемого материала с абразивным. Так, увеличение концентрации углерода в обрабатываемом материале приводит к снижению интенсивности физико-химических процессов при шлифовании: при увеличении в обрабатываемом материале концентрации углерода на 0,1 % коэффициент сродства снижается примерно на 10 %, а увеличение содержания углерода в обрабатываемом материале в 2 раза снижает коэффициент сродства более чем в 1,2 раза.

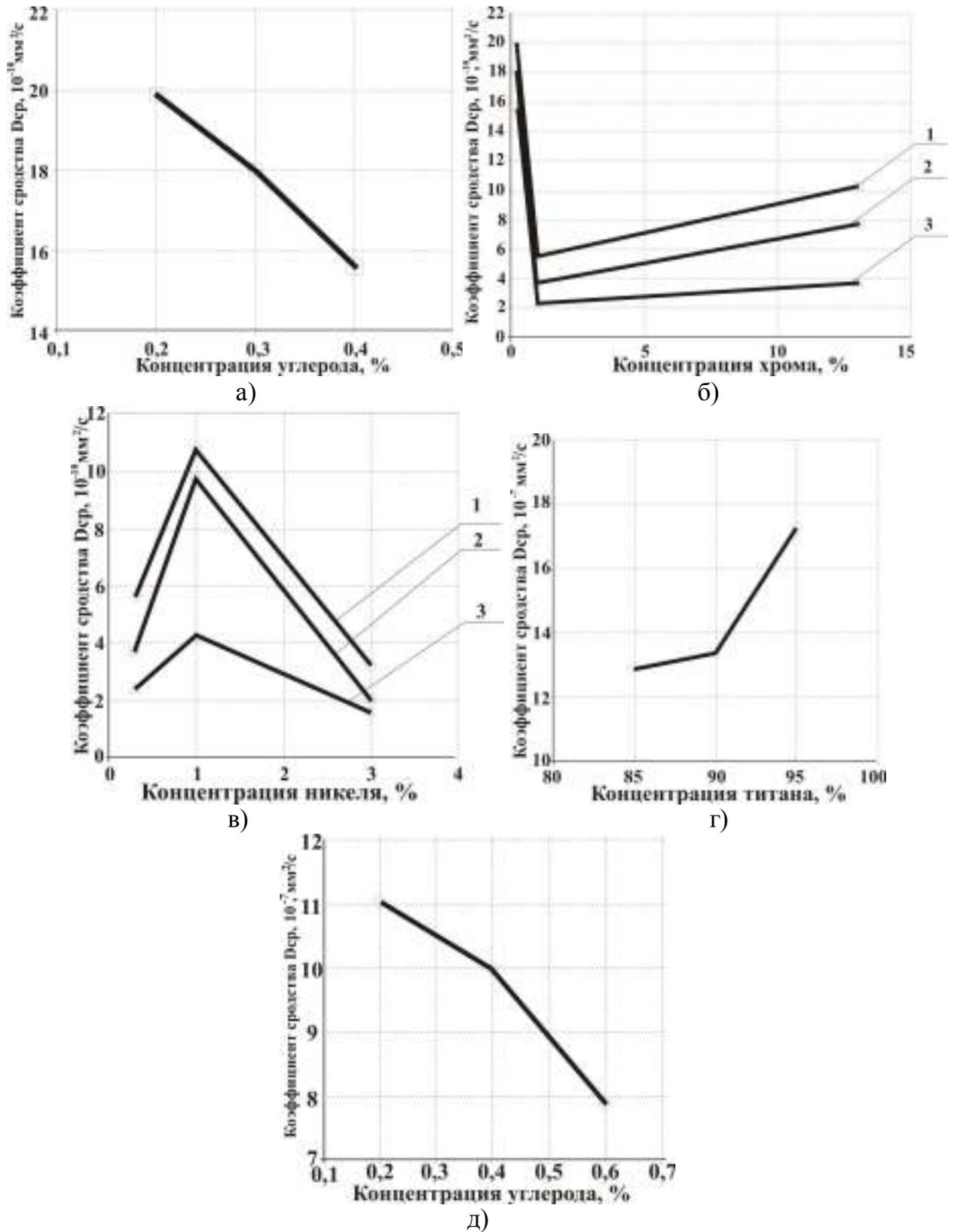


Рисунок 3.3.7. Зависимость коэффициента сродства электрокорунда белого к различным материалам от концентрации в них: а) углерода, б) и в) хрома и никеля соответственно, при концентрации углерода 1 – 0,2, 2 – 0,3 и 3 – 0,4 %, г) титана, д) углерода, с присутствием 1 % марганца

Не столь однозначное влияние на коэффициент сродства оказывает концентрация хрома и никеля. При обработке материалов, содержащих в своем составе менее 1 % хрома, с увеличением концентрации хрома в составе обрабатываемого материала интенсивность взаимодействия с абразивным материалом резко снижается (в 2,4...6,4 раза). В дальнейшем, увеличение концентрации хрома (более 1 %) повышает коэффициент сродства примерно в 1,23...2,0 раза. Обратное влияние оказывает концентрация никеля в шлифуемом материале. При увеличении его концентрации до 1 % происходит рост коэффициента сродства примерно в 1,3...2,6 раза. Дальнейшее увеличение концентрации никеля приводит к снижению коэффициента сродства: каждый дополнительный процент никеля уменьшает коэффициент примерно в 2 раза. Увеличение содержания титана в обрабатываемом материале приводит к возрастанию коэффициента сродства, причем превышение концентрации титана в обрабатываемом материале более 90 % приводит к увеличению коэффициента сродства в 1,3 раза. Рассмотренное влияние углерода на коэффициент сродства при обработке хромоникелевых сталей сохраняется и при обработке сталей, содержащих в своем составе марганец: повышение концентрации углерода в 3 раза снижает интенсивность химического взаимодействия между обрабатываемым и абразивным материалом более чем в 1,4 раза.

Во всех рассмотренных случаях зависимость коэффициента сродства от концентрации различных химических элементов описывается зависимостью следующего вида:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (3.3.5)$$

где y – коэффициент сродства; x – концентрация (в долях) соответствующего элемента.

В результате регрессионного анализа данных (методика приведена в Приложении Б) определены коэффициенты уравнений регрессии (таблица 3.3.4), что позволяет расчетным способом прогнозировать коэффициенты сродства для материалов с различной концентрацией химических элементов. Вопрос прогнозирования коэффициента сродства для сложнолегированных сталей и сплавов остается

открытым, поскольку требует тщательного изучения взаимного влияния легирующих элементов на величину коэффициента $D_{\text{ср}}$.

Таблица 3.3.4 – Значения коэффициентов в уравнении для определения величины коэффициента сродства

Группа обрабатываемого материала		x – концентрация элемента (в долях)	Уравнение вида $y=ax^2+bx+c$		
			Значение коэффициента		
			a	b	c
Стали конструкционные, нелегированные		углерода	-28,7	-4,2	21,8
Стали конструкционные, содержание углерода до 0,2 %	легированные никелем	никеля	-2,6	7,0	6,4
	легированные хромом	хрома	1,2	-17,0	24,0
Стали конструкционные, содержание углерода от 0,2 до 0,3 %	легированные никелем	никеля	-3,4	9,7	3,3
	легированные хромом	хрома	1,2	-17,3	22,3
Стали конструкционные, содержание углерода свыше 0,3 %	легированные никелем	никеля	-1,4	4,5	1,1
	легированные хромом	хрома	1,3	-19,2	20,3
Титановые сплавы		титана	667,3	-1157,1	514,2
Стали конструкционные, легированные марганцем (до 1%)		углерода	-13,2	2,5	11,0

На рисунке 3.3.8 приведены материалы с высоким коэффициентом сродства.

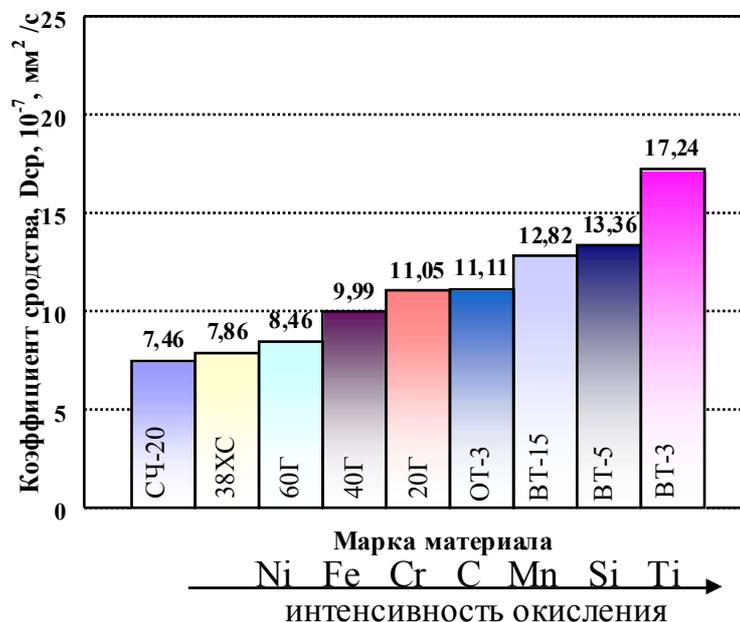


Рисунок 3.3.8 – Коэффициенты сродства материалов к электрокорунду белому и их сопоставление с рядом активности кислороду

Полученные коэффициенты сродства позволяют расположить материалы в порядке увеличения интенсивности физико-химического взаимодействия, что позволяет качественно оценить полученные результаты. Учитывая расположение

легирующих элементов указанных материалов относительно кислорода в ряду активности (см. п. 1.6) можно заключить, что наибольший коэффициент сродства имеют материалы, в составе которых присутствуют марганец, титан, кремний.

Коэффициенты сродства для других сталей приведены на рисунке 3.3.9.

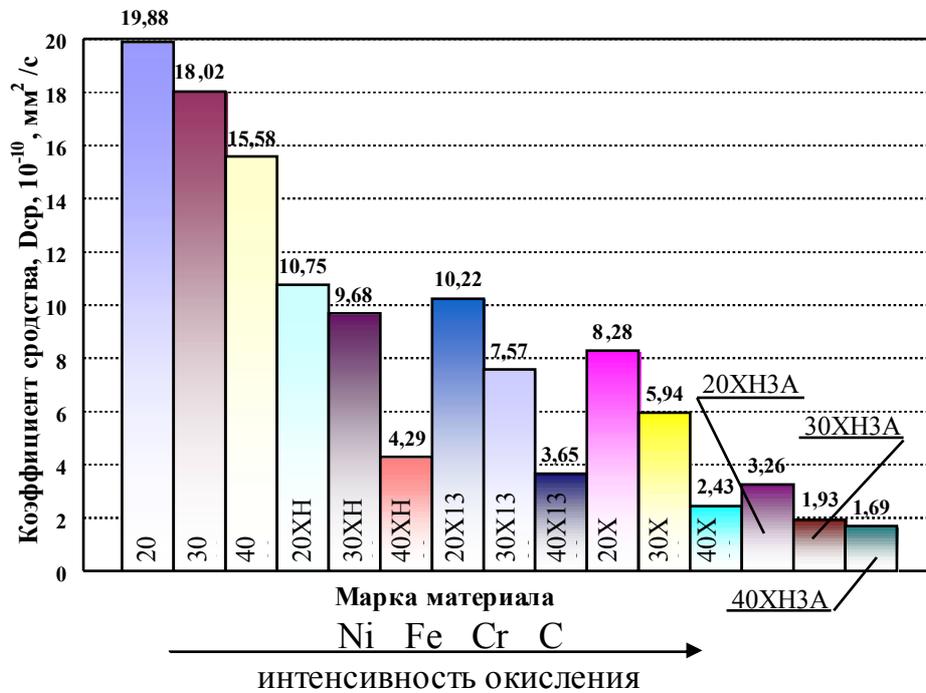


Рисунок 3.3.9 – Коэффициенты сродства материалов к электрокорунду белому и их сопоставление с рядом активности кислороду

Конструкционные нелегированные и хромоникелевые стали имеют небольшой коэффициент сродства. Следовательно, интенсивность физико-химического износа указанных сталей невелика и данный механизм износа не может играть превалирующую роль в общем износе абразивного инструмента при обработке рассматриваемых сталей. Полученные данные позволяют прогнозировать интенсивность физико-химических процессов при шлифовании обрабатываемых материалов различного химического состава, т.к. содержат сведения о влиянии того или иного химического элемента на комплексный параметр – коэффициент сродства.

3.3.5. Прогнозирование массы абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического износа

По формуле (3.3.1), с учетом данных таблиц 3.3.1 и А.3. можно рассчитать величину массы абразивного материала, изношенного в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом для различных условий взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Результаты расчетов приведены в таблицах 3.3.5 и 3.3.6, а также на рисунках 3.3.10 и 3.3.11.

Таблица 3.3.5 – Масса части абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом (F46, сталь 45, время контакта – 6 мин.)

Температура, °С	Площадка затупления $l_{3,i}$, мм							
	0,005	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
	Масса $M_{a.z.}^{\phi-x}$ изношенной части абразивного зерна, г, 10^{-7}							
200	0,012	1,04	1,91	2,94	4,11	5,40	6,80	8,31
400	0,017	1,52	2,79	4,30	6,01	7,90	9,96	12,17
600	0,020	1,82	3,34	5,15	7,19	9,46	11,92	14,56
800	0,021	1,92	3,53	5,44	7,60	9,99	12,59	15,39
1000	0,022	2,00	3,67	5,65	7,90	10,38	13,08	15,98

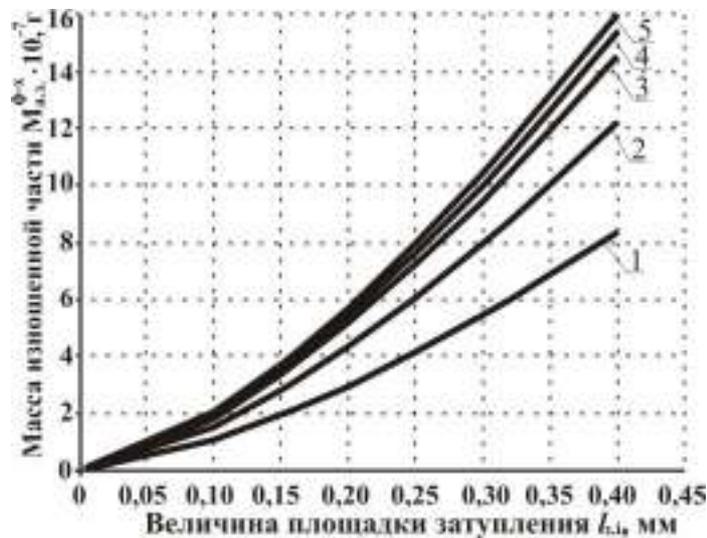


Рисунок 3.3.10 – Зависимость величины массы абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом от величины площадки затупления для различной температуры (F46, сталь 45, 6 мин):
1 – 200 °С; 2 – 400 °С; 3 – 600 °С; 4 – 800 °С; 5 – 1000 °С

Таблица 3.3.6 – Масса части абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом (F46, сталь 38ХС, время контакта – 6 мин.)

Температура, °С	Площадка затупления $l_{з.и}$, мм							
	0,005	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
	Масса $M_{а.з.}^{\phi-x}$ изношенной части абразивного зерна, г, 10^{-6}							
200	0,33	1,60	2,94	4,52	6,32	8,31	10,47	12,79
400	0,56	2,37	4,35	6,70	9,36	12,30	15,50	18,94
600	0,72	3,47	6,37	9,81	13,70	18,02	22,70	27,74
800	0,87	4,22	7,76	11,95	16,70	21,95	27,66	33,80
1000	1,19	5,73	10,53	16,21	22,65	29,77	37,52	45,84

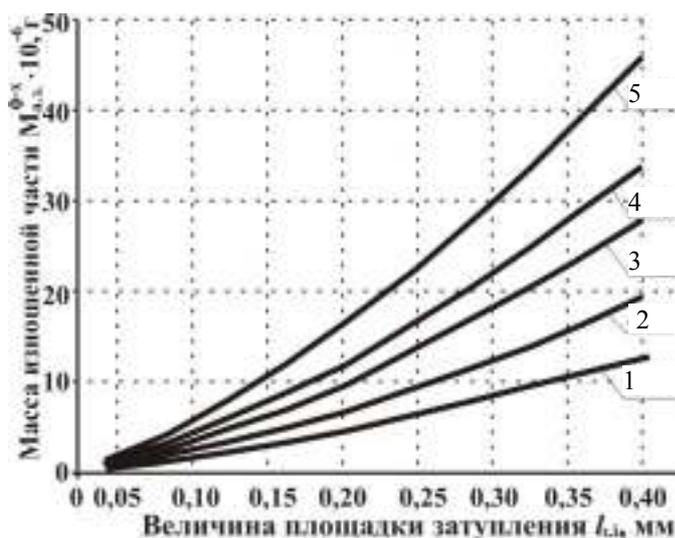


Рисунок 3.3.11 – Зависимость величины массы абразивного зерна, изношенной в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом величины площадки затупления для различной температуры (F46, сталь 38ХС, 6 мин):
1 – 200 °С; 2 – 400 °С; 3 – 600 °С; 4 – 800 °С; 5 – 1000 °С

Из рисунков 3.3.10 и 3.3.11 видно, что с увеличением исходной площадки затупления абразивного зерна увеличивается объем изношенной части абразива в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом. Аналогичным образом на величину изношенной части абразивного зерна влияет и повышение температуры, что вполне объяснимо: повышение температуры интенсифицирует физико-химические процессы в контакте абразивного и обрабатываемого материала, повышает коэффициент сродства (таблица А.3). Указанные факторы в большей степени влияют на физико-химический износ абразивного зерна при шлифовании стали 38ХС, для которой коэффициент сродства больше примерно в 500 раз, чем для стали 45.

Что касается влияния зернистости абразивного зерна, то, поскольку экспериментальное исследование физико-химического взаимодействия строится на удельной величине – коэффициенте сродства – то влияние величины абразивного зерна на интенсивность физико-химического взаимодействия между абразивным и обрабатываемым материалом во внимание не принимается.

Определим массу изношенной части абразивного зерна для различных периодов времени работы ШК, с учетом того, что начальная площадка затупления равна радиусу округления острого абразивного зерна (таблицы 3.3.7, 3.3.8 и рисунки 3.3.12 и 3.3.13).

Таблица 3.3.7 – Масса части абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом (F46, сталь 45, $l_{3,i} = 0,005$ мм)

Температура, °C	Время работы ШК T, мин							
	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
	Масса изношенной части абразива $M_{a,z}^{\phi-x}$, г, 10^{-10}							
200	0,19	0,97	1,94	3,87	5,81	7,74	9,68	11,62
400	0,28	1,42	2,83	5,67	8,50	11,34	14,17	17,01
600	0,34	1,70	3,39	6,78	10,17	13,57	16,96	20,35
800	0,36	1,79	3,58	7,17	10,75	14,34	17,92	21,50
1000	0,37	1,86	3,72	7,44	11,17	14,89	18,61	22,33

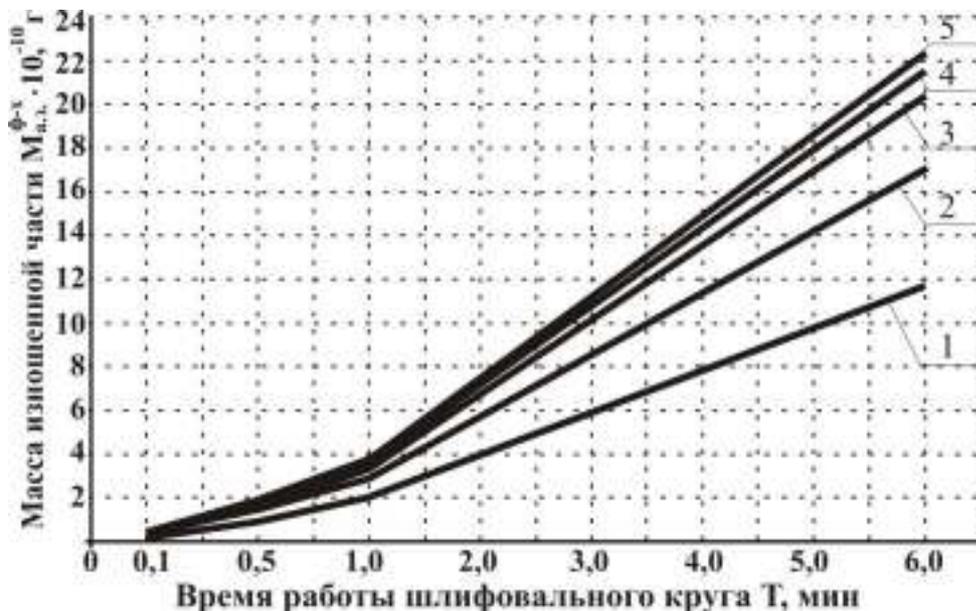


Рисунок 3.3.12 – Зависимость величины массы абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом от времени работы для различной температуры (сталь 45, $l_{3,i} = 0,005$ мм):
1 – 200 °C; 2 – 400 °C; 3 – 600 °C; 4 – 800 °C; 5 – 1000 °C

Таблица 3.3.8 – Масса части абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом (F46, сталь 38ХС, $l_{3,i-1} = 0,005$ мм)

Температура, °С	Время работы ШК Т, мин							
	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
	Масса изношенной части абразива, г, 10^{-8}							
200	0,03	0,15	0,84	3,10	5,01	9,33	15,33	33,11
400	0,04	0,18	1,04	6,37	8,82	16,44	27,02	56,38
600	0,06	0,32	1,83	8,18	15,51	28,89	47,48	71,79
800	0,08	0,39	2,23	6,56	18,89	35,20	57,85	87,47
1000	0,11	0,53	3,02	10,68	25,62	47,75	78,46	118,64

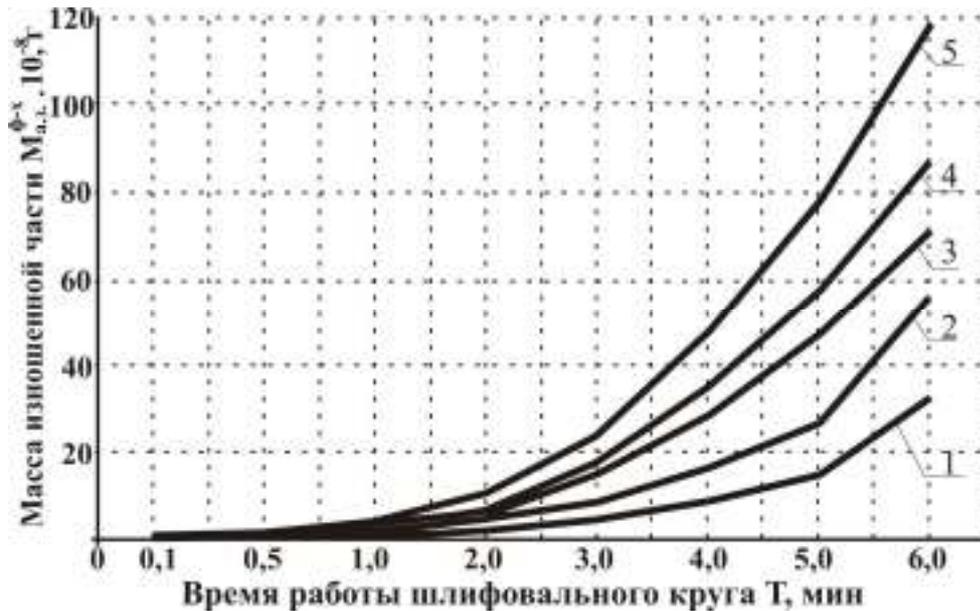


Рисунок 3.3.13 – Зависимость величины массы абразивного зерна, изношенной в результате его физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом от времени работы для различной температуры (сталь 38ХС, $l_{3,i-1}=0,005$ мм):
1 – 200 °С; 2 – 400 °С; 3 – 600 °С; 4 – 800 °С; 5 – 1000 °С

Из рисунков 3.3.12 и 3.3.13 видно прямое влияние времени и температуры шлифования на величину изношенной в результате физико-химического взаимодействия части абразивного зерна: с увеличением времени и температур контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом величина изношенной части увеличивается.

3.4. Обобщенная математическая модель износа абразивного зерна

3.4.1. Основное уравнение

Обобщая результаты исследований механического и физико-химического износа абразивного зерна в процессах шлифования, объединяя формулы (3.2.6) и

(3.3.1), получаем обобщенную формулу для определения массы изношенной части абразивного зерна в результате совместного действия механического и физико-химического износа при шлифовании:

$$M_{a.з.} = \frac{60V_k \cdot \rho_a \cdot w_{a.з.}^m \cdot T \cdot \exp \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho \cdot 10^{23}} \cdot \sigma}{2kT_t} + \frac{n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3}} \cdot I_0 \left(i, \frac{q \cdot M_m}{6 \cdot \rho \cdot 10^{23}} \cdot \sigma \right)}{+0,08\rho_m \frac{M_m}{m} C_0 I_3^{3/2} D_{cp}^{1/2} \left(1 + \frac{v_3}{60V_k}\right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3}} v_k^{1/2} \frac{T}{D_k}} \quad (3.4.1)$$

Разработанная модель (3.4.1) является многофакторной: она учитывает различные технологические условия работы абразивного зерна. Данное обстоятельство позволяет использовать ее для прогнозирования величины изношенной части абразивного зерна, работающего в различных технологических условиях. Также модель (3.4.1) позволяет определить величину износа абразивного зерна в любой момент времени работы инструмента, поскольку одним из учитываемых аргументов является время шлифования.

Опытным путем установлено, что достаточные изменения рабочей поверхности ШК происходят через 30 с работы инструмента [23], следовательно, в настоящем исследовании все расчеты будем вести для интервала 30 с.

3.4.2. Сравнительный анализ различных механизмов износа

Анализируя данные таблиц 3.2.5, 3.2.6, 3.3.5–3.3.8, а также графиков, приведенных на рисунках 3.2.8–3.2.10 и 3.3.10–3.3.13, можно заключить следующее.

1. При абразивной обработке любого конструкционного материала присутствует как механический, так и физико-химический износ. Интенсивность каждого механизма износа зависит от температуры в зоне контакта, времени контакта инструмента с заготовкой, а также величины площадки затупления, имеющейся на абразивных зернах ШК.

2. Механический износ в большей степени зависит от действительного сопротивления обрабатываемого материала шлифованию, т.к. от него зависит величина напряжений, действующих в теле абразивного зерна, определяющая долговечность абразивного материала. При этом, чем меньше температура в зоне контакта абразивного зерна и обрабатываемого материала, тем больше напряжения в теле абразивного зерна, меньше его долговечность, следовательно, больше его механический износ.

3. Величина физико-химического износа прямопропорциональна коэффициенту сродства: материалы, содержащие химические элементы, интенсивно окисляющиеся при обработке – марганец, кремний, титан, молибден, имеют коэффициент химического сродства в десятки раз больше, чем стали 45, 40Х, 40ХН и т.д., следовательно, вклад этого механизма в величину суммарного износа абразивного зерна гораздо больше.

Представленная на рисунке 3.4.1. качественная картина очень хорошо сочетается с количественными характеристиками, непосредственно влияющими на каждый из рассмотренных механизмов износа. Наибольшим сопротивлением шлифованию обладает сталь 60Г [103, 105], при этом коэффициент ее химического сродства имеет среднюю величину. У стали 38ХС действительное сопротивление шлифованию [103, 105] и коэффициент химического сродства имеют наименьшие значения из рассмотренных, следовательно, величина части абразивного зерна, изношенная в результате действия соответствующих механизмов износа, имеет меньшую величину.

Так, для стали 38ХС доля физико-химического износа абразивного зерна составляет 15...42 %, стали 60Г – 12...28 %, сплава ВТ-15 – 10...47 %. Для представителя группы конструкционных нелегированных сталей – стали 45, доля физико-химического износа абразивного зерна крайне мала и не превышает 2 %. Это говорит о том, что физико-химический износ абразивного зерна при обработке таких сталей не оказывает существенного влияния на общую величину износа, а превалирует механический износ абразивного зерна.

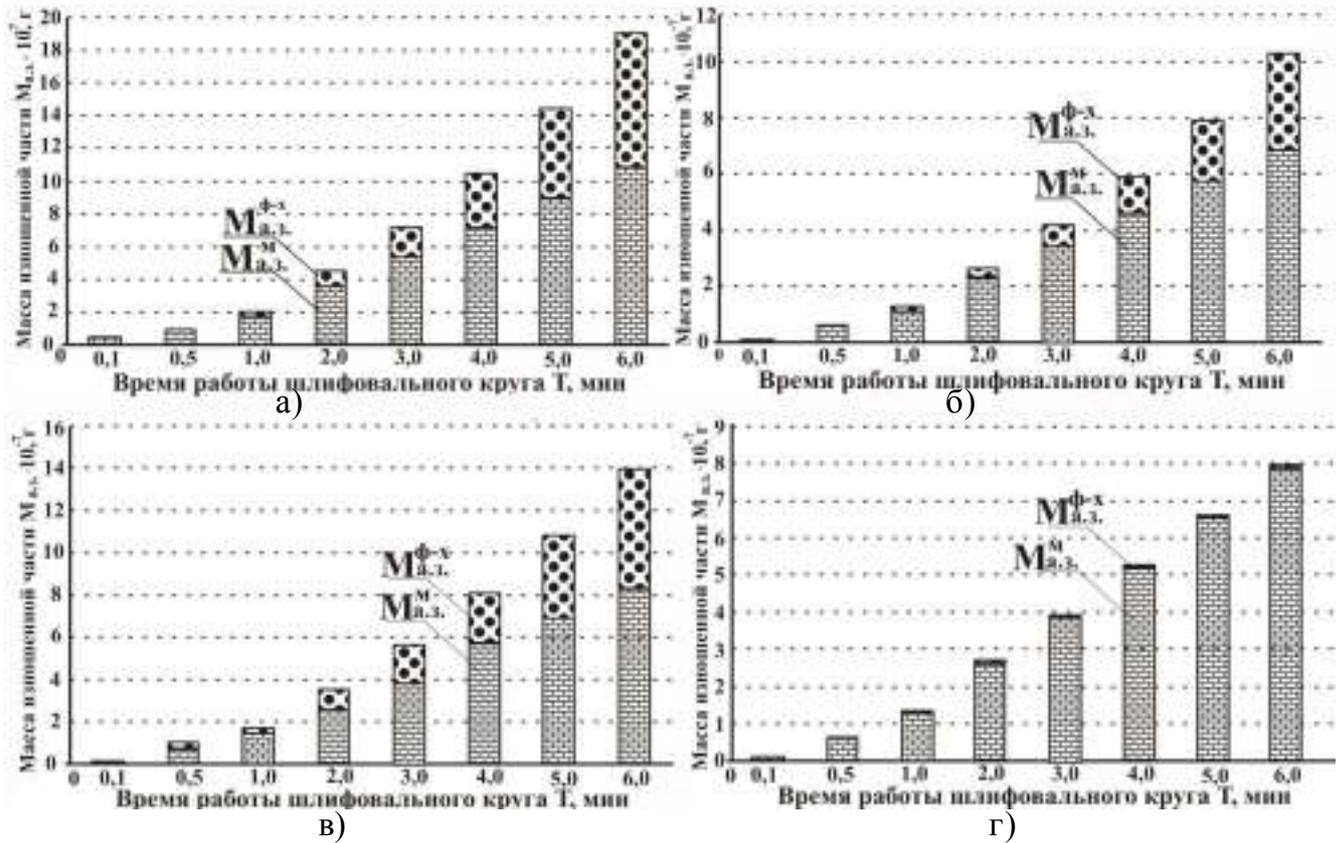


Рисунок 3.4.1 – Зависимость суммарного износа абразивного зерна, с учетом различных его механизмов, от времени при шлифовании различных марок сталей ($T_t = 600^\circ\text{C}$) и сплавов: а) 38ХС; б) 60Г; в) ВТ-15; г) 45

3.5. Математическая рекурсивная модель размера площадки затупления абразивного зерна

Для определения величины площадки затупления в зависимости от объема изношенной части абразивного зерна аппроксимируем зерно конусом [148, 259, 310] и поместим его в систему координат XOY (рисунок 3.5.1).

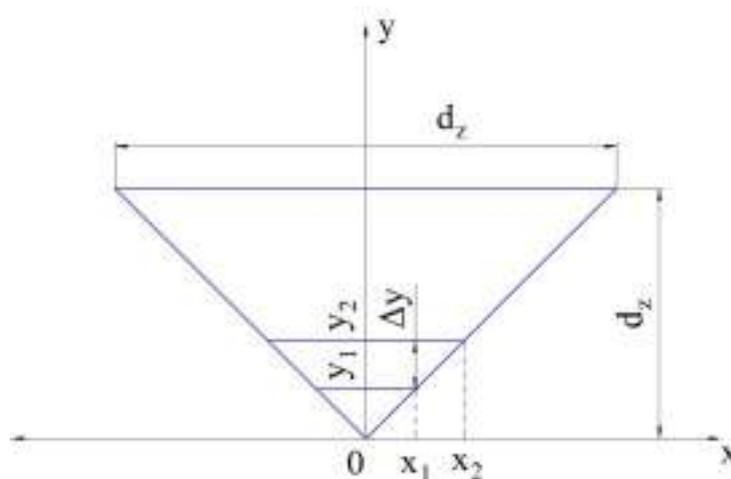


Рисунок 3.5.1 – Схема к определению размера площадки затупления

Введем следующие обозначения: x_1 – радиус площадки износа абразивного зерна до контакта с обрабатываемой поверхностью ($l_{3,i-1}$), x_2 – радиус площадки износа абразивного зерна после контакта с обрабатываемой поверхностью ($l_{3,i}$), y_1 – координата вершины зерна до контакта с обрабатываемой поверхностью, y_2 – координата вершины зерна после контакта с обрабатываемой поверхностью, $\Delta y = y_2 - y_1$ – величина линейного износа абразивного зерна. Искомая величина – x_2 – радиус площадки затупления зерна.

Объем усеченного конуса определяется по формуле:

$$V = \frac{1}{3} \pi h (r^2 + rR + R^2), \quad (3.5.1)$$

где h – высота конуса; r – радиус меньшего основания, R – радиус большего основания.

Приводя выражение (3.5.1) в соответствии с рисунком 3.5.1 получаем:

$$V = \frac{1}{3} \pi \Delta y (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2) \quad (3.5.2)$$

Учитывая, что $\Delta y = y_2 - y_1$, а также, что $x_1 = y_1$, а $x_2 = y_2$, после раскрытия скобок и упрощения получаем

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{3} \pi (y_2 - y_1) (y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2) = \frac{1}{3} \pi (y_2 y_1^2 + y_1 y_2^2 + y_2^3 - y_1^3 - y_1^2 y_2 - y_1 y_2^2) = \\ &= \frac{1}{3} \pi (y_2^3 - y_1^3) \end{aligned} \quad (3.5.3)$$

Выражаем искомую величину y_2 :

$$y_2 = \sqrt[3]{y_1^3 + \frac{3V}{\pi}} \quad (3.5.4)$$

Переходя к обозначениям, принятым в работе и учитывая плотность абразивного материала, получим:

$$l_{3,i} = \sqrt[3]{l_{3,i-1}^3 + \frac{3V}{\pi}} = \sqrt[3]{l_{3,i-1}^3 + \frac{3M_{a.з.}}{\pi \rho_a}} \quad (3.5.5)$$

Учитывая (3.4.1), получаем

$$l_{3,i}^3 = 2 \left[l_{3,i-1}^3 + \frac{3 \cdot 60V_k \cdot w_{a.z.}^m \cdot T \cdot \exp \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}}}{2kT_t} + n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3}} \cdot I_0 \left(i_3, \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{6 \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \right) \cdot \pi + \frac{3 \cdot 0,08 \rho_m \frac{M_m}{m} C_0 l_{3,i-1}^{3/2} D_{cp}^{1/2} \left(1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3}} V_k^{1/2} \frac{T}{D_k}}{\pi \rho_a} \right] \quad (3.5.6)$$

Упрощая, окончательно получаем математическую зависимость для определения величины площадки затупления абразивного зерна в любой момент времени его взаимодействия с обрабатываемым материалом:

$$l_{3,i}^3 = 2 \left[l_{3,i-1}^3 + \frac{180V_k \cdot w_{a.z.}^m \cdot T \cdot \exp \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{12kT_t \cdot \rho_a \cdot 10^{23}}}{12kT_t \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} + n_k \cdot \left(1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3 (D_k + d_3)}} \cdot I_0 \left(i_3, \frac{q \cdot M_m \cdot \sigma}{12kT_t \cdot \rho_a \cdot 10^{23}} \right) \cdot \pi + \frac{0,24 C_0 l_{3,i-1}^{3/2} D_{cp}^{1/2} \left(1 + \frac{v_3}{60V_k} \right) \sqrt{\frac{D_k \cdot d_3 \cdot v_{спад}}{n_3}} V_k^{1/2} \rho_m M_m T}{D_k m \pi \rho_a} \right] \quad (3.5.7)$$

Входящая в (3.5.7) кинетическая модель термофлуктуационного износа абразивного зерна, описывающая его механический износ, модель физико-химического износа абразивного зерна в качестве аргументов содержат величину исходной площадки затупления – $l_{3,i-1}$. От величины этой площадки также зависят механо-химические процессы износа, протекающие при шлифовании. Следовательно, созданная обобщенная многофакторная модель площадки затупления абразивного зерна является рекурсивной, т.е. учитывает нелинейную обратную связь по площадке затупления абразивного зерна, образованной в результате его предыдущего контакта (единичного или множества контактов в течение периода времени) с обрабатываемым материалом в каждый момент времени работы инструмента.

Кроме этого, разработанная модель является комплексной. В ней учтен ряд параметров, которые можно разделить на следующие группы:

- технологические параметры эксплуатации инструмента (режимы шлифования): $V_k, v_z, T, T_b, n_z, v_{\text{спад}}$;
- геометрические параметры взаимодействующих тел: $D_k, d_z, l_{z,i-1}$;
- физические константы материалов: $q, M_{\text{пб}}, \rho_a, C_0, \rho_m, m_d, m$;
- эмпирически определяемые параметры: $w_{\text{а.з.}}^M, \sigma, D_{\text{ф}}$.

Учет в модели (3.5.7) большого количества исходных параметров, а также условий работы абразивного инструмента делает возможным прогнозирование величины площадки затупления абразивного зерна в широком диапазоне эксплуатации инструмента. Для реализации модели (3.5.7) необходимо разработать алгоритм расчета величины площадки затупления абразивного зерна в соответствии с описанными выше условиями.

3.6. Алгоритм расчета размера площадки затупления абразивного зерна

Алгоритм расчета размера площадки затупления абразивного зерна с обратной связью по величине площадки затупления в каждый момент времени j работы круга представлен на рисунке 3.6.1.

В качестве исходных данных (блок 2) для расчета принимаются:

- характеристика ШК (прочностные, физико-химические характеристики материала абразивных зерен, их размер, исходная величина площадки затупления);
- характеристики обрабатываемого материала (прочностные, физико-химические характеристики);
- режимы работы круга (глубина и скорость резания);
- полное время работы круга (по истечении которого требуется определить суммарный износ абразивного зерна);
- временной интервал расчета.

В блоке 3 формируется текущий порядковый номер расчета, определяемый исходя из заданной величины суммарного времени расчета и временного интервала.

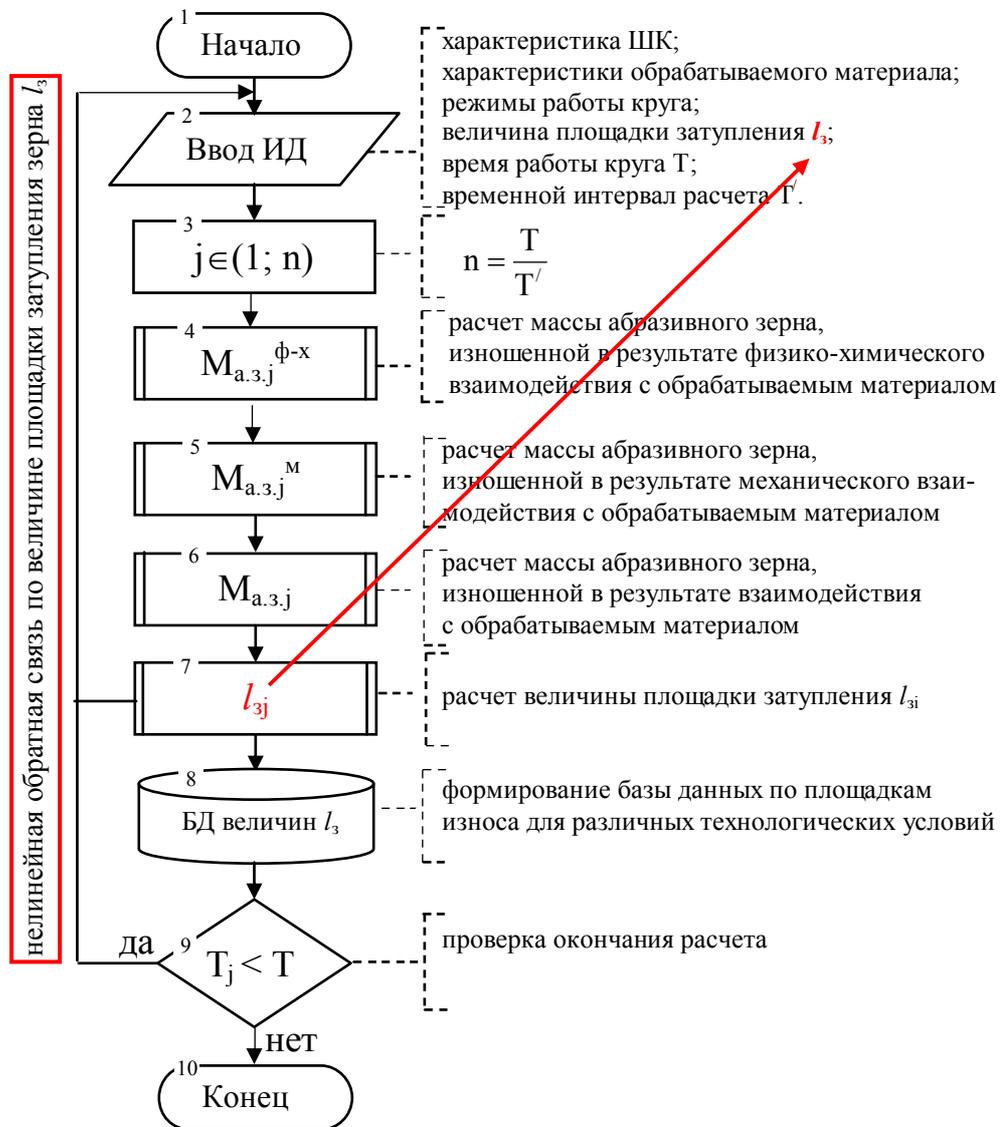


Рисунок 3.6.1 – Алгоритм рекурсивной модели площадки затупления абразивного зерна

В блоках 4 и 5 реализуют расчет величины изношенной части абразивного зерна в результате механического и физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом.

В блоке 6 рассчитывается суммарный износ абразивного зерна вследствие механического и физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом.

В блоке 7 рассчитывается величина площадки затупления по формуле (3.5.7).

В блоке 8 формируется база данных по величинам площадки затупления различных абразивных зерен при обработке разных материалов. Накопление сведений о площадке затупления позволит вернуться к расчету на любом его этапе.

В блоке 9 осуществляется проверка временного интервала расчета: не превышает ли он заданный период времени работы инструмента. Если не превышает, то выполняется следующая рекурсия, при этом в качестве величины исходной площадки затупления принимается величина, рассчитанная в предыдущем шаге расчета. Точность расчета зависит от величины временного интервала, принятого в качестве исходного данного.

Расчет объема части абразивного зерна, изношенной в результате физико-химического и механического взаимодействия с обрабатываемым материалом также представим в виде алгоритмов (рисунки 3.6.2 и 3.6.3 соответственно).



Рисунок 3.6.2 – Алгоритм расчета износа абразивного зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом

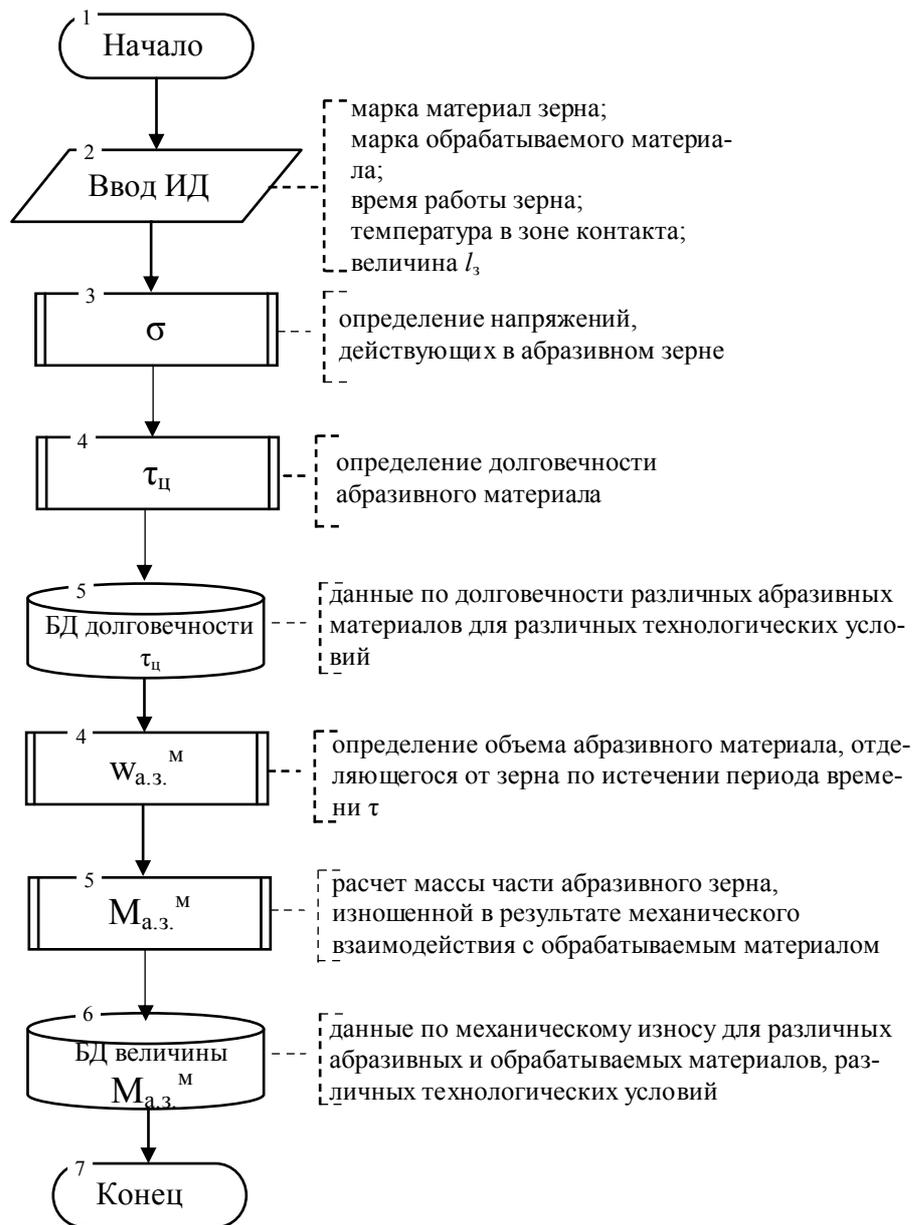


Рисунок 3.6.3 – Алгоритм расчета износа абразивного зерна в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом

Разработанные алгоритмы для расчета величины площадки износа абразивного зерна могут быть встроены в компьютерные пакеты, разработанные для определения различных величин показателей шлифования [274–276]. Особенностью представленных алгоритмов является то, что в них учитывается обратная связь по площадке затупления, т.е. в каждый момент времени работы инструмента учитывается состояние его рабочей поверхности. Реализация этого откроет новые возможности расчетного прогнозирования величин показателей ШК с целью проектирования операций шлифования с учетом состояния режущего инструмента.

3.7. Адекватность разработанной модели размера площадки затупления

Поскольку разработанная модель износа отличается от существующих и описанных в технической литературе своими подходами, то необходимо оценить ее адекватность в плане сопоставимости с другими известными результатами экспериментов, а также с результатами прямых измерений размеров площадок затупления. Для этого, в соответствии с методикой комплексной оценки параметров рабочего слоя ШК [100], было выполнено фотометрическое исследование площадок затупления абразивных зерен ШК после круглого врезного шлифования заготовок из различных материалов.

Также было выполнено сопоставление с аналогичными данными А.А. Дьяконова, А.А. Маталина и С.Н. Корчака. Результаты сопоставления полученных данных с другими данными приведены в таблице 3.7.1 и на рисунке 3.7.1.

Таблица 3.7.1 – Сопоставление расчетных величин площадок затупления с результатами их прямого измерения, а также с другими данными

Зерни- стость	Мат-л зг.	По данным	Время работы круга T , мин					
			1	2	3	4	5	6
			Величина площадки затупления, $l_{3,i}$, мм					
F60	45	А.А. Маталина [184]	0,100					
		С.Н. Корчака [148]	0,100					
		А.А. Дьяконова [100]	0,130	0,133	0,140	0,143	–	–
		измерения	0,110	0,150	0,160	0,165	–	–
		расчета (3.5.7)	0,141	0,146	0,155	0,163	–	–
F46	45	А.А. Маталина [184]	0,150					
		С.Н. Корчака [148]	0,100					
		А.А. Дьяконова [100]	0,210	0,225	0,220	0,210	0,212	0,220
		измерения	0,185	0,201	0,230	0,240	0,248	0,273
		расчета (3.5.7)	0,165	0,205	0,233	0,254	0,272	0,288
	38XC	А.А. Маталина [184]	0,150					
		С.Н. Корчака [148]	0,100					
		измерения	0,164	0,225	0,242	0,282	–	–
		расчета (3.5.7)	0,188	0,241	0,277	0,311	–	–
	60Г	А.А. Маталина [184]	0,150					
		С.Н. Корчака [148]	0,100					
		измерения	0,138	0,162	0,171	0,175	–	–
		расчета (3.5.7)	0,139	0,152	0,163	0,172	–	–

В работах А.А. Маталина [184 и др.] и С.Н. Корчака [148 и др.] площадка затупления $l_{3,i}$ абразивного зерна принималась постоянной. При этом не учитывались ни характеристика инструмента, ни условия его эксплуатации. Данные, полученные по результатам расчета в соответствии с разработанной моделью (3.5.7),

хорошо согласуются с результатами измерения площадок затупления абразивных зерен, а также данными, полученными А.А. Дьяконовым.

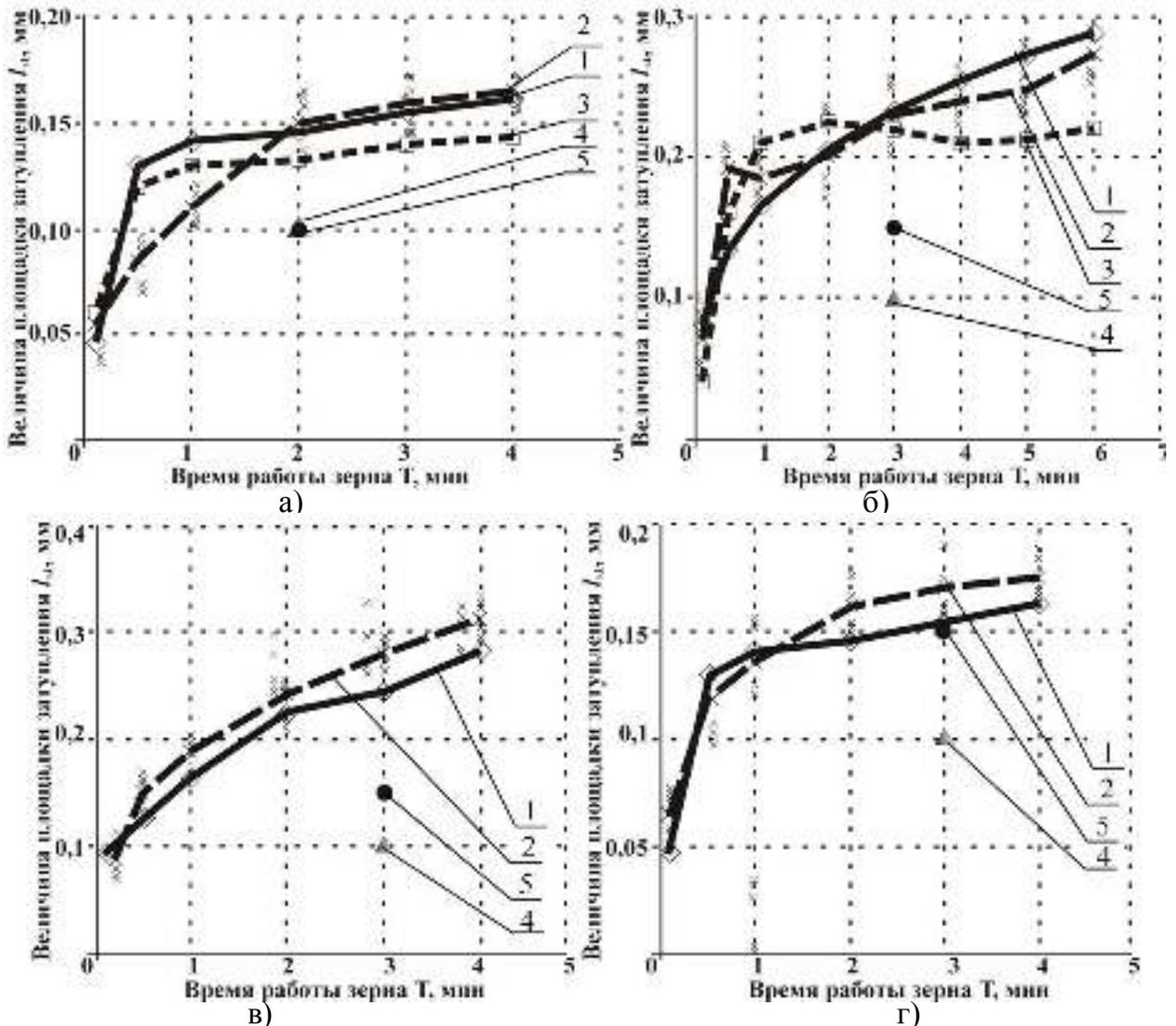


Рисунок 3.7.1 – Сопоставление результатов расчета (1) размера площадки затупления абразивных зерен с другими данными: 2 – эксперимента; 3 – А.А. Дьяконова [100]; 4 – С.Н. Корчака [148]; 5 – А.А. Маталина [184] для зернистости F60 (а) и F46 (б–г) при обработке различных сталей: а), б) 45; в) 38ХС; г) 60Г

Рисунок 3.7.1. демонстрирует хорошую сопрягаемость результатов, полученных расчетным путем по формуле (3.5.7), а также то, что они не противоречат результатам прямых измерений величин площадок затупления абразивных зерен.

Для расчетной зависимости характерно плавное увеличение величины площадки затупления абразивного зерна, в то время как экспериментальные кривые (2 и 3) демонстрируют резкое возрастание величины площадки, затем небольшое ее снижение и вновь плавное возрастание. По-видимому, процесс образования площадки затупления сопровождается характеристическими особенностями в на-

чальный период работы абразивного зерна. В этот период погрешность расчета по формуле (3.5.7) превышает 20 %, что объясняется, в том числе, нормативными допусками на зерновой состав.

В итоге, разработанная модель расчетного определения величины площадки затупления не противоречит данным, описанным в технической литературе, а также результатам прямого измерения величин площадок затупления на поверхности ШК. Анализ модели (3.5.7) показал, что по ней можно осуществлять прогнозирование размера площадки затупления абразивного зерна для различных технологических условий с общей погрешностью расчета, не превышающей 10 %.

3.8. Выводы

1. Разработана обобщенная математическая модель величины изношенной части абразивного зерна (в массовом выражении), учитывающая его механический и физико-химический износ.

2. Механический износ рассмотрен с позиций кинетической теории прочности твердых тел. Разработана математическая модель долговечности абразивного зерна для различных технологических условий операции шлифования.

3. Установлена величина напряжений, действующих в теле абразивного зерна при шлифовании, в зависимости от зернистости абразивного зерна и температуры в зоне контакта.

4. Физико-химический износ определяется по модели Г.В. Лоладзе, Т.Н. Бокучавы, для реализации которой был предложен коэффициент сродства, а также разработана экспериментальная методика его определения.

5. Получены уравнения, позволяющие прогнозировать коэффициент сродства при обработке материалов, легированных разными химическими элементами.

6. Разработана математическая модель расчета размера площадки затупления единичного абразивного зерна, учитывающая технологические условия выполнения операции шлифования, а также время работы инструмента.

7. Разработан алгоритм расчета размера площадки затупления единичного абразивного зерна, с учетом нелинейной обратной связи по величине площадки затупления, рассчитанной на предыдущем шаге.

Глава 4. Прогнозирование работоспособности шлифовальных кругов

4.1. Постановка задачи создания системы прогнозных моделей

Работоспособность создаваемой системы прогнозных моделей эксплуатационных показателей определяется, прежде всего, их способностью быстро дать информацию об уровне эксплуатационных свойств инструмента. Для этого прогнозных модели должны быть имитационными. Сформулированная и обоснованная в п. 2.1. необходимость реализации процесса проектирования с учетом реального времени работы инструмента требует учета временного характера процесса шлифования при разработке системы прогнозных моделей работоспособности ШК. Необходимо также принимать во внимание достаточно большое количество технологических факторов, влияющих на работоспособность инструмента и качество обработки, их сочетаний, в т.ч. не описанных ранее в литературе.

В связи с этим, основными критериями создания системы прогнозных моделей являются следующие:

- система прогнозных моделей должна включать в себя модель:
 - ✓ силы шлифования;
 - ✓ шероховатости шлифованной поверхности;
 - ✓ температуры шлифования.
- прогнозных модели должны быть имитационными;
- модели должны быть комплексными, т.е. должны учитывать большое количество технологических параметров;
- модели должны быть континуальными, т.е. должны позволять определять величины эксплуатационных показателей в любой момент времени работы инструмента.

4.2. Прогнозирование радиальной составляющей силы шлифования

4.2.1. Прогнозная модель

Для прогнозирования величины радиальной составляющей силы шлифования в любой момент времени работы ШК принимаем имитационную стохастиче-

скую модель, предложенную А.А. Дьяконовым. В ее основу положена вероятностная модель строения рабочей поверхности ШК и вероятностная модель силы шлифования [105].

Выполненная А.А. Дьяконовым программная реализация модели в виде модуля расчета силы шлифования в нашем случае должна быть скорректирована (рисунок 4.2.1).

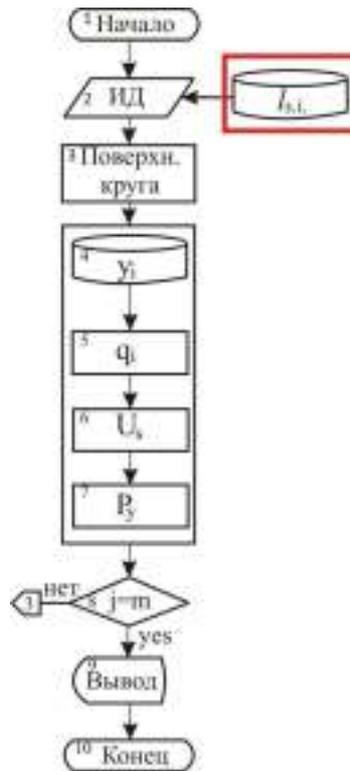


Рисунок 4.2.1 – Алгоритм прогнозной имитационной модели силы шлифования

Вначале реализуется алгоритм расчета величины площадки затупления на единичном абразивном зерне ШК (рисунок 3.6.1). Затем сформированная база данных по величинам площадки затупления, входит в состав исходных данных. Это позволяет осуществлять прогнозирование изменения величины радиальной составляющей силы шлифования от времени и режима работы инструмента.

4.2.2. Экспериментальная проверка прогнозной модели

Для проверки разработанной модели были выполнены экспериментальные измерения силы шлифования при круглом врезном шлифовании [221]. Измерения

проводились на установке и в соответствии с методикой, описанной в Приложении Б.

Для обеспечения адекватности условий расчета и проведения эксперимента технологические параметры операции шлифования и прогнозирования радиальной составляющей силы шлифования были идентичны. Экспериментальные и расчетные значения приведены в таблице 4.2.1 и на рисунке 4.2.2.

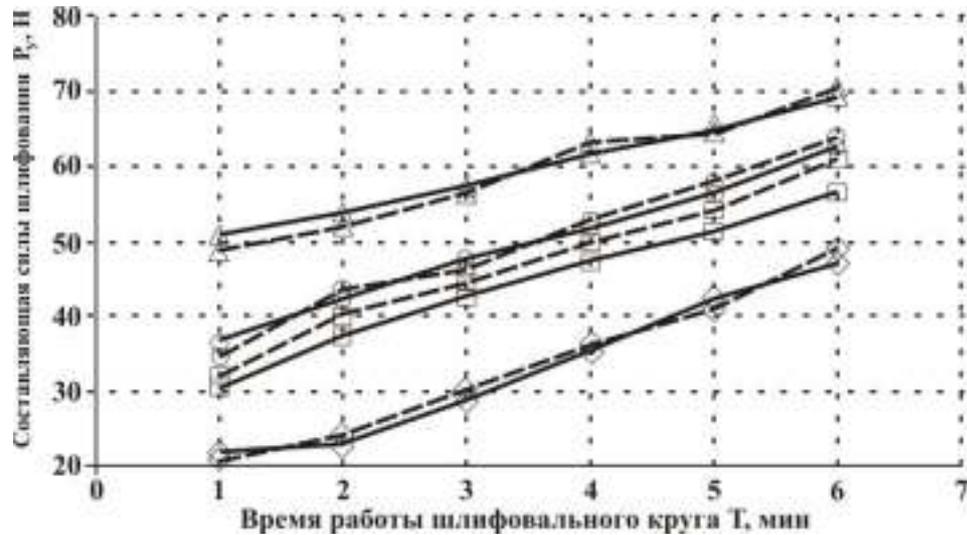
Таблица 4.2.1 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

Характеристика круга	Материал заготовки – сталь	$v_{\text{Срад}}$, мм/мин	T, мин	Расчетное значение P_y , Н	Эксперим. значение P_y , Н	Относит. погрешность Δ_0 , %
24AF60L7V	45	0,3	1,0	21,3	21,0	1,4
			2,0	22,9	24,0	4,8
			3,0	28,8	30,0	4,2
			4,0	35,6	36,0	1,1
			5,0	42,2	41,0	2,8
			6,0	47,1	49,0	4,0
	40XH	0,3	1,0	30,2	32	6,0
			2,0	37,3	40,2	7,8
			3,0	42,5	44,3	4,2
			4,0	47,5	49,9	5,1
			5,0	51,3	54,2	5,7
			6,0	56,4	61,3	8,7
24AF60L7V	40XH	0,5	1,0	36,5	34,2	6,3
			2,0	42,3	43,1	1,9
			3,0	47,4	45,9	3,2
			4,0	51,8	52,7	1,7
			5,0	56,2	57,6	2,5
			6,0	62,3	63,4	1,8

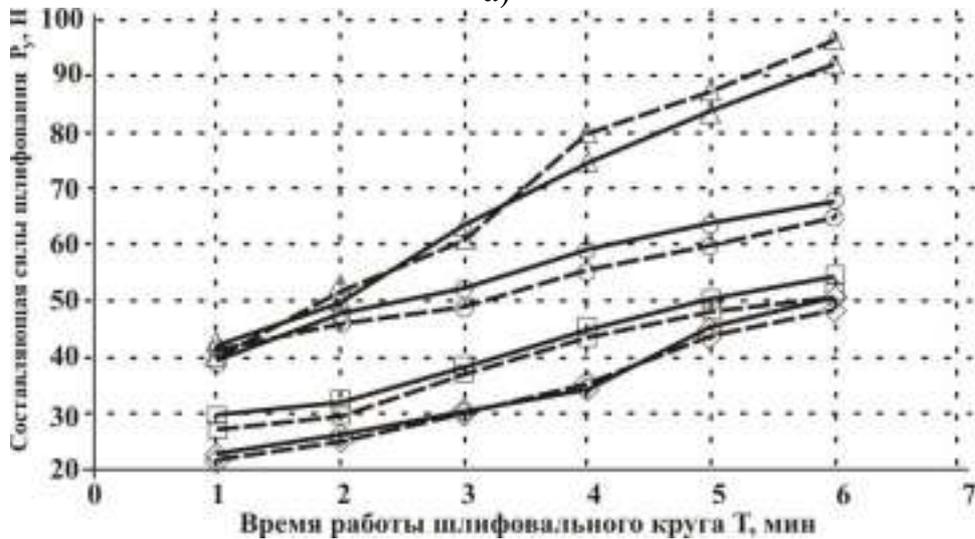
Характеристика круга	Материал заготовки – сталь	$v_{\text{Срад}}$, мм/мин	T, мин	Расчетное значение P_y , Н	Эксперим. значение P_y , Н	Относит. погрешность Δ_0 , %
24AF46L7V	45	0,3	1,0	22,6	21,6	4,4
			2,0	26,3	25,1	4,6
			3,0	30,5	29,8	2,2
			4,0	34,1	35,2	3,2
			5,0	45,1	43,6	3,3
			6,0	51,2	48,3	5,7
		0,5	1,0	39,4	41,3	4,8
			2,0	47,8	46,5	2,7
			3,0	52,3	48,8	6,7
			4,0	59,0	55,3	6,3
			5,0	63,6	59,6	6,3
			6,0	67,8	64,7	4,6
	40ХН	0,3	1,0	29,2	27,2	6,8
			2,0	31,6	29,7	6,0
			3,0	38,2	37,5	1,8
			4,0	44,6	43,2	3,1
			5,0	49,9	48,2	3,4
			6,0	54,2	51,3	5,4
		0,5	1,0	42,2	40,1	5,0
			2,0	49,9	51,9	4,0
			3,0	63,3	60,8	3,9
			4,0	74,6	79,8	7,0
			5,0	83,7	87,1	4,1
			6,0	92,1	96,5	4,8

Из таблицы 4.2.1 и рисунка 4.2.2 видно, что полученные расчетным путем значения радиальной составляющей силы шлифования P_y не противоречат экспериментальным значениям, измеренным в результате стендового испытания ШК. Относительная погрешность расчета при этом не превышает 10 %, следовательно, предложенная прогнозная модель радиальной составляющей силы шлифования может быть использована для прогнозирования работоспособности инструмента и

определения, в дальнейшем, режимно-временной области его рациональной эксплуатации в различных технологических условиях.



а)



б)

Рисунок 4.2.2 – Сопоставление расчетных (—) и экспериментальных (— —) данных при шлифовании кругом а) 24AF60L7V и б) 24A F46L7V:

подача 0,5 мм/мин: ▲ – сталь 40X, ■ – сталь 45;

подача 0,3 мм/мин: ▣ – сталь 40X, ○ – сталь 45.

4.3. Прогнозирование шероховатости шлифованной поверхности

4.3.1. Прогнозная модель

Для прогнозирования величины шероховатости шлифованной поверхности за основу принимаем имитационную модель, разработанную Л.В. Шипулиным, в основу которой положено геометрическое взаимодействие абразивных зерен трехмерного рабочего слоя ШК с обрабатываемой заготовкой [324]. При этом взаимо-

действие ШК с обрабатываемой заготовкой строится по дискретной схеме: результат шлифования – множественное резание отдельными абразивными зернами, каждое из которых может быть представлено конусом с площадкой затупления. В итоге, на обработанной поверхности формируется множество единичных абразивных царапин (рисунок 4.3.1) [324].

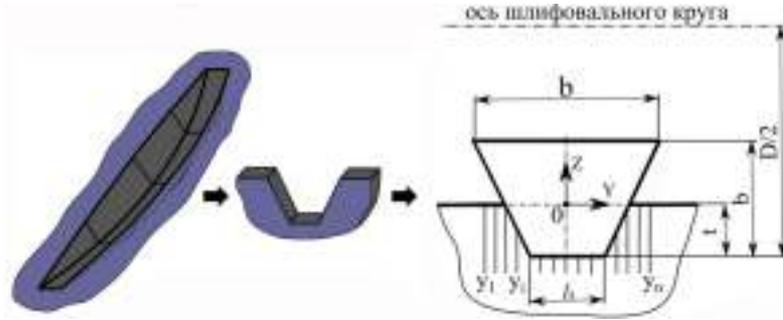


Рисунок 4.3.1 – Единичная абразивная царапина

Для каждого поперечного сечения царапины определяется ее профиль [324]:

$$z(x, y) = \begin{cases} z_0 + h_{\text{изн}} + x & \text{при } x_0 - \frac{b}{2} < x < x_0 + \frac{l_{3.i}}{2} \\ z_0 - h_{\text{изн}} & \text{при } x_0 - \frac{l_{3.i}}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{l_{3.i}}{2} \\ z_0 + h_{\text{изн}} + x & \text{при } x_0 + \frac{l_{3.i}}{2} < x < x_0 + \frac{b}{2} \end{cases} \quad (4.3.1)$$

где x_0 – координата центра царапины, $l_{3.i}$ и $h_{\text{изн}}$ – соответственно размер (диаметр) изношенной площадки на зерне и линейный износ зерна.

Поскольку абразивное зерно представлено конусом, то между диаметром площадки затупления и линейным износом абразивного зерна имеется зависимость:

$$h_{\text{изн}} = \frac{l_{3.i} - l_{3.i-1}}{2} \quad (4.3.2)$$

Соответственно для определения величины площадки затупления необходимо использовать модель (3.5.7).

Прогнозирование изменения величины шероховатости шлифованной поверхности во времени работы инструмента становится возможным за счет встраивания в алгоритм реализации модели Л.В. Шипулина, модуля определения величины площадки затупления на абразивном зерне в соответствии с моделью (3.5.7).

4.3.2. Экспериментальная проверка прогнозной модели

Модель Л.В. Шипулина, принятая для прогнозирования [324], является чисто геометрической, описывающей взаимодействие двух твердых тел – единичного абразивного зерна и заготовки. При этом свойства абразивного и обрабатываемого материала в модели никак не учитываются. Интеграция модуля расчета величины площадки затупления абразивного зерна в существующую имитационную модель шероховатости шлифованной поверхности формирует прогнозную модель, в которой путем учета величины площадки затупления абразивного зерна опосредованно учитываются такие важные технологические факторы, как свойства обрабатываемого материала заготовки (механические – через действительное сопротивление материала шлифованию σ_i [105], физико-химические – через коэффициент сродства D_{cp} (см. п. 3.3.3)), а также характеристики абразивного материала (механические – через долговечность $\tau_{ц}$ (см. п. 3.2), физико-химические – через D_{cp} (см. п. 3.3.3)).

Для оценки адекватности результатов взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом на разработанном стенде исследования процесса микрорезания [222, 223] была выполнена серия экспериментов, позволяющая оценить влияние износа единичных абразивных зерен на длину формируемых ими на обработанной поверхности абразивных царапин. Описание установки и экспериментальной методики приведено в Приложении В.

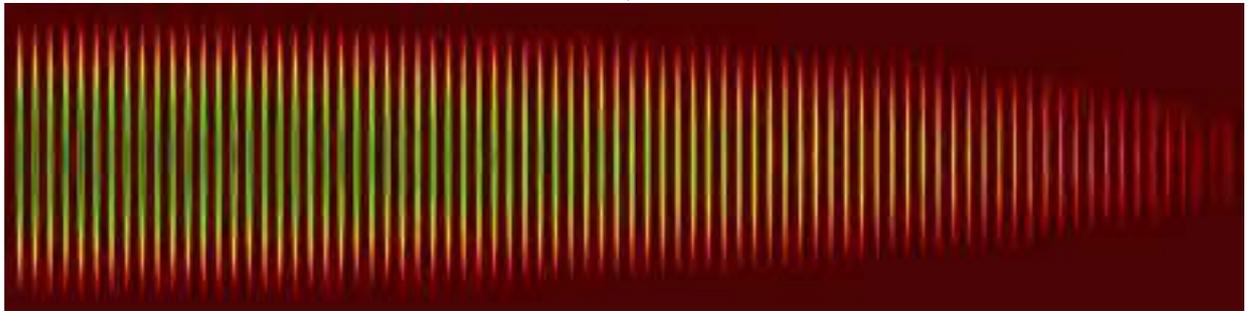
На заготовке (экспериментальном образце) образовывался ряд единичных царапин (рисунок 4.3.2, а). Для таких же параметров проводился расчет в имитационной модели и строился график поверхности с цветовой индикацией высот рельефа после обработки (рисунок 4.3.2, б). По этой методике проведен ряд экспериментов, два из которых для различных глубин резания представлены в таблице 4.3.1. Отметим, что без учета износа в имитационной геометрической модели, все царапины на рисунке 4.3.2 имели одинаковые размеры.

В соответствии с данными, приведенными в таблице 4.3.1, можно сделать следующие выводы. Начальная и конечная длина царапин, полученных в ходе реального эксперимента и в ходе моделирования, сопоставима между собой. Длина

царапин под номерами 10–60, полученных в результате моделирования, значительно отличается от экспериментальной, при этом значения среднего изменения длины царапин на одно взаимодействие зерна с заготовкой при моделировании и в эксперименте сопоставимы, а погрешность при этом не превышает 7,5%.



а)



б)

Рисунок 4.3.2 – Микрорельеф поверхности после резания единичным абразивным зерном, полученный в ходе эксперимента (а) и при моделировании (б)

Таблица 4.3.1 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Источник данных	Номер царапины								Среднее изменение длины царапины на одно взаимодействие, мм
	1	10	20	30	40	50	60	70	
	Глубина резания t , мм								
	0,070								
Длина царапины $l_{ц}$, мм									
Эксперимент 1	8,5	5,0	4,5	3,9	4,5	3,5	3,3	3,1	0,077
Эксперимент 2	8,4	4,0	2,9	2,8	2,8	2,6	2,6	2,7	0,081
Средние значения	8,5	4,5	3,7	3,4	3,6	3,0	3,0	2,9	0,080
Моделирование	8,3	7,9	7,5	6,8	5,9	4,8	3,8	3,2	0,074
Погрешность, %	–								7,5
	Глубина резания t , мм								
	0,035								
	Длина царапины $l_{ц}$, мм								
Эксперимент 1	6	4,5	2,8	3	3	3	2,3	2,1	0,055
Эксперимент 2	6	4	3	2,5	3	3	3,3	3,2	0,040
Средние значения	6	4,6	3,3	3,1	3,3	3	2,8	2,6	0,047
Моделирование	6	5,8	5,7	5,5	5,2	4,8	3,9	2,5	0,050
Погрешность, %	–								6,0

Таким образом, установлено влияние изнашивания абразивного зерна на длину абразивных царапин, формируемых в процессе микрорезания.

Для проверки адекватности созданной прогнозной модели шероховатости шлифованной поверхности было проведено имитационное моделирование, а также серия стендовых испытаний ШК в соответствии с методикой, изложенной в Приложении Б. Результаты приведены в таблице 4.3.2. На рисунке 4.3.3 приведены графики зависимости шероховатости шлифованной поверхности от времени, полученные имитационным моделированием и прямым измерением.

Таблица 4.3.2 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

Характеристика круга	Материал заготовки – сталь	$v_{\text{Срад}}$, мм/мин	T, мин	Расчетное значение Ra, мкм	Эксперим. значение Ra, мкм	Относит. погрешность Δ_0 , %
24AF60L7V	45	0,3	1,0	0,54	0,59	9,26
			2,0	0,79	0,72	8,86
			3,0	1,04	1,00	3,85
			4,0	1,15	1,14	0,87
			5,0	1,33	1,29	3,01
		0,5	1,0	0,88	0,80	9,09
			2,0	1,21	1,18	2,48
			3,0	1,52	1,45	4,61
			4,0	1,67	1,68	0,60
			5,0	1,97	1,92	2,54
	40XH	0,3	1,0	0,66	0,72	9,09
			2,0	0,79	0,81	2,53
			3,0	1,11	1,07	3,60
			4,0	1,24	1,22	1,61
			5,0	1,41	1,38	2,13
		0,5	1,0	1,07	0,98	8,41
			2,0	1,32	1,27	3,79
			3,0	1,55	1,52	1,94
			4,0	1,72	1,77	2,79
			5,0	2,01	1,93	3,98

Обращает на себя внимание тот факт, что в начальный период работы круга разница в полученных значениях составляет порядка 8...9 %, что также характерно для результатов эксперимента по исследованию длин царапин (см. рисунок 4.3.2 и таблицу 4.3.1).

На среднем этапе работы, после приработки зерен и образования на них площадки затупления, характерной для стабильной работы инструмента, сопоставимость результатов моделирования и прямого эксперимента повышается и погрешность составляет порядка 2...5 %. Вероятно это может быть объяснено особенностями этапа приработки абразивного зерна.

Анализ полученных данных по величинам шероховатости показывает, что разница между расчетными и экспериментальными значениями составляет не более 10 %. Это говорит о том, что предложенная имитационная модель шероховатости шлифованной поверхности может быть использована для прогнозирования работоспособности инструмента и определения, в дальнейшем, режимно-временной области его рациональной эксплуатации в различных технологических условиях.

Также полученные расчетным путем результаты хорошо сочетаются с данными В.Ф. Гурьянихина, В.В. Агафонова и А.А. Панкова [93], Н.И. Веткасова, А.В. Степанова [63], Р.М. Стрельчука [291] и др.

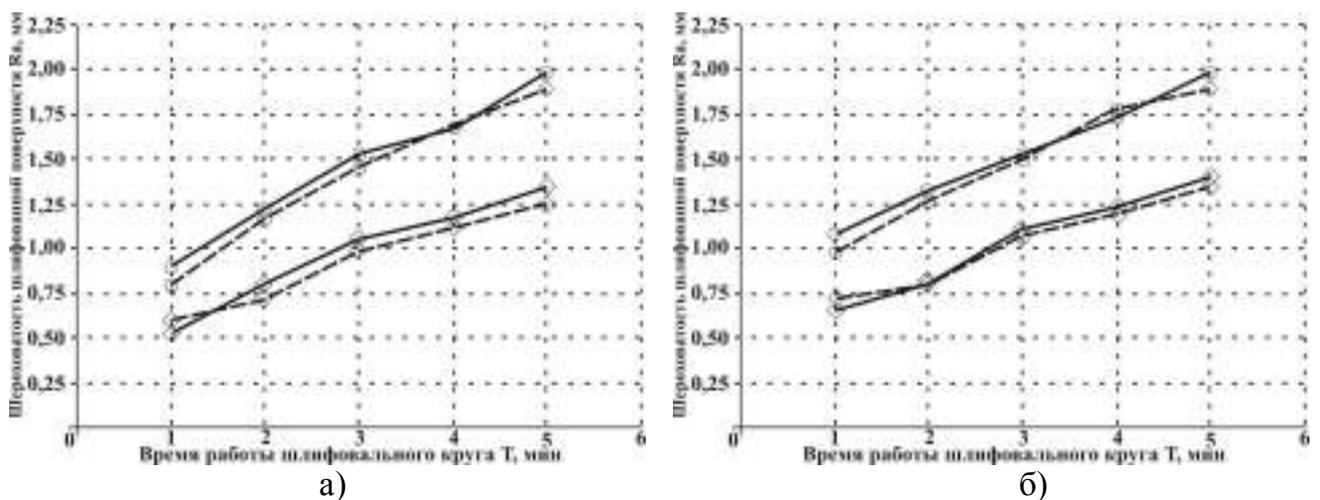


Рисунок 4.3.3 – Сопоставление расчетных (—) и экспериментальных (---) данных при шлифовании кругом 24AF60L7V, на подаче \circ – 0,5 мм/мин; \square – 0,3 мм/мин:
а) стали 45; б) стали 40ХН

4.4. Прогнозирование температуры шлифования

4.4.1. Прогнозная модель

Для прогнозирования температуры в зоне шлифования за основу принимаем имитационную модель А. А. Дьяконова, численно реализуемую средствами суперкомпьютерных вычислений [105]:

$$\begin{aligned}
 U(x,y;z;t) = & \sum_{i=0}^{k(t)} \frac{2q_i(U_i^c)}{\sqrt{\pi\chi}} \int_{t_h}^t e^{-\frac{z^2}{4\chi t'}} \left[e^{\frac{V_y^2 \gamma^2}{4\chi}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{|y-l_y|}{\sqrt{4\chi\lambda_t}} + \frac{V_y \sqrt{4\chi\gamma}}{4\chi} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{|y-l_y-h_y|}{\sqrt{4\chi\gamma}} + \frac{V_y \sqrt{4\chi\gamma}}{4\chi} \right) \right] \right] \left[e^{\frac{V_x^2 \gamma^2}{4\chi}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{|x-l_x(t)|}{\sqrt{4\chi\gamma}} + \frac{V_x \sqrt{4\chi\gamma}}{2\chi} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{|x-l_x(t)-h_x(t)|}{\sqrt{4\chi\gamma}} + \frac{V_x \sqrt{4\chi\gamma}}{2\chi} \right) \right] \right] \times e^{-\frac{V_y^2 \gamma^2}{4\chi}} e^{-\frac{V_x^2 \gamma^2}{4\chi}} d\gamma
 \end{aligned} \tag{4.4.1}$$

Модель (4.4.1) учитывает нелинейность по интенсивности теплоподвода в зону шлифования, что является одной из принципиальных особенностей процессов шлифования [105]. Нелинейность проявляется в виде обратной связи через прочностную температурно-скоростную характеристику обрабатываемого материала $\sigma_i = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, U)$, предопределяющую интенсивность тепловыделения на очередном источнике – зерне [105].

В тепловой модели (4.4.1) в качестве теплового источника принят квадрат, со стороной, равной величине площадки затупления. В исследовании А. А. Дьяконова эта величина принималась постоянной – 0,1 мм [105]. Прогнозирование изменения величины температуры в зоне шлифования в зависимости от времени работы инструмента становится возможным за счет встраивания в алгоритм расчета модели (4.4.1) модуля расчета величины площадки затупления в соответствии с моделью (3.5.7) (рисунок 4.4.1).

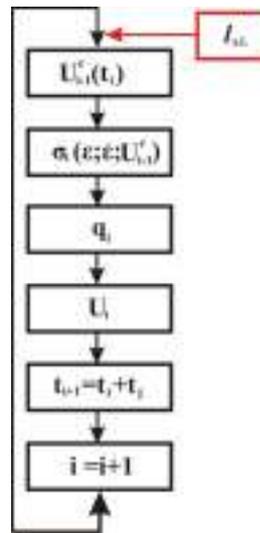


Рисунок 4.4.1 – Алгоритм учета обратной нелинейной связи по прочностной температурно-скоростной характеристике обрабатываемого материала

4.4.2. Экспериментальная проверка прогнозной модели

Поскольку модель (4.4.1) является стохастической, то было реализовано пять редуций для одинаковых условий шлифования: сталь 45, глубина резания единичным зерном – 0,01 мм при различных площадках затупления, соответствующих различному времени работы абразивного зерна.

Для проверки адекватности созданной прогнозной имитационной модели температуры в зоне шлифования выполним сопоставление данных, полученных путем расчета по формуле (4.4.1) с результатами прямого измерения температуры, выполненными А.А. Дьяконовым [100]. Результаты сопоставления приведены в таблице 4.4.1 и на рисунке 4.4.2.

Таблица 4.4.1 – Расчетные и экспериментальные данные

	№ повт.	Время работы ШК Т, мин									
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
		Температура в зоне шлифования U(x), град									
Расчет	1	91,56	188,54	344,20	478,96	652,98	685,40	731,77	810,86	876,39	903,26
	2	94,28	174,69	324,60	465,35	624,63	708,78	795,03	824,66	860,26	922,70
	3	89,99	205,65	337,87	469,99	598,00	718,60	767,01	828,44	860,08	909,86
	4	102,36	221,36	321,46	497,11	599,68	714,84	826,54	878,11	886,07	933,07
	5	86,74	177,15	360,62	485,67	571,83	703,60	735,92	851,10	906,44	921,93
	Ср.	92,99	193,48	337,75	479,42	609,42	706,24	771,25	838,63	877,85	918,16
Эксп.	1	90	205	360	480	610	650	710	842	–	–
	Погр. Δ _о , %	5,5	3,4	6,6	0,1	0,1	8,6	7,9	0,4	–	–

Из таблицы 4.4.1 видно, что отличие данных, полученных расчетным путем по модели (4.4.1), с учетом алгоритма (см. рисунок 4.4.1), от данных, полученных прямым измерением величины температуры в зоне контакта [221] не превышает 10 %.

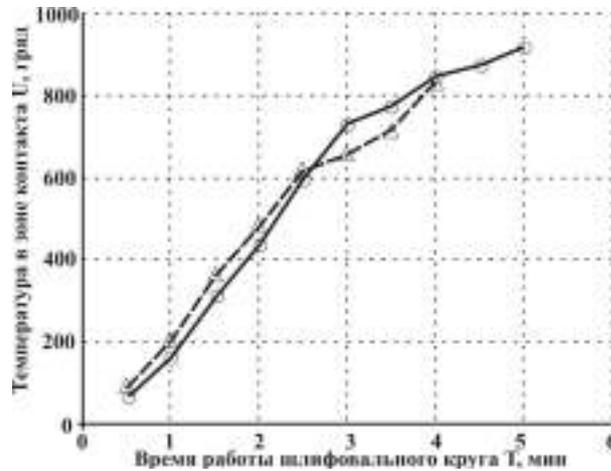


Рисунок 4.4.2 – Сопоставление расчетных (—) и экспериментальных (---) данных при шлифовании кругом 24AF60L7V стали 45

Рисунок 4.4.2 также свидетельствует о достаточном совпадении экспериментальных и расчетных данных.

Полученные результаты говорят о том, что предложенная прогнозная модель величины температуры в зоне шлифования может быть использована для прогнозирования работоспособности абразивного инструмента и определения в дальнейшем режимно-временной области его рациональной эксплуатации в различных технологических условиях.

4.5. Выводы

1. Создана система прогнозных моделей для определения эксплуатационных показателей шлифовальных кругов.
2. Разработана методика прогнозирования эксплуатационных показателей шлифовальных кругов различных характеристик в изменяющихся технологических условиях с учетом времени работы инструмента.

Глава 5. Создание комплекса инженерных методик континуального проектирования операций шлифования

5.1. Методика определения режимно-временной области эксплуатации шлифовального круга

Методика базируется на системе логических решений (высказываний), формируемых с помощью аппарата математической логики – логики высказываний. Данные модели являются наиболее подходящими, поскольку при выборе характеристики инструмента и назначении режимов обработки на основе методики континуального проектирования положительное решение принимается в случае выполнения всех требований, предъявляемых к операции шлифования, т.е. все технологические ограничения выполняются – имеют значение «истина» (см. п. 2.4).

Требования, предъявляемые к выполнению операции шлифования, необходимо сопоставить с эксплуатационными показателями, уровень которых обеспечивает выполнение операции, а также каждому требованию присвоить свою логическую переменную (таблица 5.1.1), учитывающую время работы ШК, в течение которого он обеспечивает определенный уровень показателей выполняемой операции.

Таблица 5.1.1 – Логические переменные для обработки партии деталей

№ п/п	Обеспечиваемое требование	Показатель	Ограничение	Время работы круга, мин			
				1	2	...	m
				Обозначение переменных			
1	IT	P_{y3}	$P_{y3} \leq P_{yn}$	T_1^1	T_1^2	...	T_1^m
2	Ra	Ra_3	$Ra_3 \leq Ra_n$	T_2^1	T_2^2	...	T_2^m
3	U	U_3	$U_3 \leq U_n$	T_3^1	T_3^2	...	T_3^m
...
k	T_k^1	T_k^2	...	T_k^m

Выполнение логической переменной T_k^m , т.е. наличие у нее значения 1 – «истина» – означает, что соответствующее ограничение выполняется в пределах определенного периода времени работы ШК, следовательно, эксплуатационный по-

казатель обеспечивает достижение соответствующего технического требования, предъявляемого к операции шлифования.

Первый этап проектирования (см. п. 2.1) реализуется на основе имеющихся любых сведений и рекомендаций по назначению характеристики инструмента, в результате чего формируется номенклатура ШК, возможных для обработки всех партий заготовок, поступаемых на станок. На втором этапе происходит ранжирование сформированной номенклатуры кругов в соответствии с технологическими ограничениями и целевой функцией (п. 2.2, 2.4). В завершении второго этапа происходит окончательный выбор характеристики ШК, которая отвечает всем критериям и обеспечивает выполнение целевой функции (2.2.1).

При этом, например, круг характеристики X_j выбирается в том случае, если его уравнение принимает значение «истина». В противном случае рассматриваемая характеристика круга отвергается (значение «ложь»). Уравнение выбора ШК j -ой характеристики выглядит следующим образом:

$$X_j = T_1^1 \wedge T_1^2 \dots \wedge T_1^m \wedge T_2^1 \wedge T_2^2 \dots \wedge T_2^m \dots \wedge T_k^m \quad (5.1.1)$$

Использование логической связки «и» (конъюнкции) между переменными обеспечивает выполнение всего множества требований к выполнению операции шлифования (m). Выполнение уравнения (5.1.1) говорит о том, что рассматриваемая характеристика инструмента способна обеспечить выполнение комплекса требований к операции шлифования.

Для каждой характеристики круга, определенного режима его эксплуатации и времени работы составляются таблицы применимости для различных технологических условий (обрабатываемый материал, требования к выполнению операции шлифования).

Опишем несколько конкретных примеров. Имеется два круга различных характеристик. Имеются сведения о работоспособности каждого инструмента, полученные по результатам прогнозирования его эксплуатационных показателей, а также из стендовых испытаний [23, 24]. Для одинаковых условий эксплуатации кругов составляются логико-технологические карты и карты применимости каждого круга (таблицы 5.1.2 – 5.1.5).

Таблица 5.1.2 – Логико-технологическая карта круга 24AF46L7V 50 м/с

Исходные данные				Сведения о работоспособности круга					
Подача круга $v_{\text{спрэд}}$, мм/мин	Обеспечиваемое требование чертежа	Значение требования	Показатель	Время работы круга, мин					
				1	2	3	1	2	3
				Значение показателя			Логическая переменная		
0,2	Г	5	$R_{y\text{,}} \text{ Н/мм}$	1,1	2,4	3,6	T_1^1	T_1^2	T_1^3
	Отсутствие прижогов	600	$U, \text{ град}$	150	190	230	T_2^1	T_2^2	T_2^3
	$R_a, \text{ мкм}$	0,8	$R_{a\text{,}} \text{ мкм}$	0,53	0,65	0,86	T_3^1	T_3^2	T_3^3
	$Q_m, \text{ мм/мин}$	0,123	$Q_{m\text{,}} \text{ мм/мин}$	0,099	0,097	0,093	T_4^1	T_4^2	T_4^3
	$Q_a, \text{ мм/мин}$	0,002	$Q_{a\text{,}} \text{ мм/мин}$	0,001	0,004	0,008	T_5^1	T_5^2	T_5^3
0,3	Г	5	$R_{y\text{,}} \text{ Н/мм}$	2,80	4,07	–	T_1^1	T_1^2	T_1^3
	Отсутствие прижогов	600	$U, \text{ град}$	220	280	–	T_2^1	T_2^2	T_2^3
	$R_a, \text{ мкм}$	0,8	$R_{a\text{,}} \text{ мкм}$	0,74	0,92	–	T_3^1	T_3^2	T_3^3
	$Q_m, \text{ мм/мин}$	0,123	$Q_{m\text{,}} \text{ мм/мин}$	0,149	0,146	–	T_4^1	T_4^2	T_4^3
	$Q_a, \text{ мм/мин}$	0,002	$Q_{a\text{,}} \text{ мм/мин}$	0,002	0,005	–	T_5^1	T_5^2	T_5^3
0,5	Г	5	$R_{y\text{,}} \text{ Н/мм}$	6,87	8,40	–	T_1^1	T_1^2	T_1^3
	Отсутствие прижогов	600	$U, \text{ град}$	400	450	–	T_2^1	T_2^2	T_2^3
	$R_a, \text{ мкм}$	0,8	$R_{a\text{,}} \text{ мкм}$	0,96	1,16	–	T_3^1	T_3^2	T_3^3
	$Q_m, \text{ мм/мин}$	0,123	$Q_{m\text{,}} \text{ мм/мин}$	0,248	0,242	–	T_4^1	T_4^2	T_4^3
	$Q_a, \text{ мм/мин}$	0,002	$Q_{a\text{,}} \text{ мм/мин}$	0,002	0,008	–	T_5^1	T_5^2	T_5^3

Таблица 5.1.3 – Карта применимости круга 24AF46L7V 50 м/с

Подача круга $v_{\text{спрэд}}$ мм/мин	Показатель	Время работы круга, мин		
		1	2	3
		Значение логической переменной T		
0,20	$R_{y\text{,}} \text{ Н/мм}$	1	1	0
	$U, \text{ град}$	1	1	0
	$R_{a\text{,}} \text{ мкм}$	1	1	0
	$Q_{m\text{,}} \text{ мм/мин}$	0	0	0
	$Q_{a\text{,}} \text{ мм/мин}$	1	1	1
0,30	$R_{y\text{,}} \text{ Н/мм}$	1	0	0
	$U, \text{ град}$	1	1	0
	$R_{a\text{,}} \text{ мкм}$	1	0	0
	$Q_{m\text{,}} \text{ мм/мин}$	1	1	0
	$Q_{a\text{,}} \text{ мм/мин}$	1	0	0
0,50	$R_{y\text{,}} \text{ Н/мм}$	0	0	0
	$U, \text{ град}$	1	1	0
	$R_{a\text{,}} \text{ мкм}$	0	0	0
	$Q_{m\text{,}} \text{ мм/мин}$	0	0	0
	$Q_{a\text{,}} \text{ мм/мин}$	0	0	0

Таблица 5.1.4 – Логико-технологическая карта круга 92AF60L7V 50 м/с

Исходные данные				Сведения о работоспособности круга					
Подача круга $V_{\text{Срэд}}$ мм/мин	Обеспечиваемое требование чертежа	Значение требования	Показатель	Время работы круга, мин					
				1	2	3	1	2	3
				Значение показателя			Логическая переменная		
0,2	Г	5	$R_{y\text{э}}$, Н/мм	1,00	1,10	1,87	T_1^1	T_1^2	T_1^3
	Отсутствие прижогов	600	U, град	150	190	230	T_2^1	T_2^2	T_2^3
	Ra, мкм	0,8	Ra _э , мкм	0,41	0,51	0,64	T_3^1	T_3^2	T_3^3
	Qm, мм/мин	0,123	Qm _э , мм/мин	0,100	0,099	0,098	T_4^1	T_4^2	T_4^3
	Qa, мм/мин	0,002	Qa _э , мм/мин	0,001	0,002	0,002	T_5^1	T_5^2	T_5^3
0,3	Г	5	$R_{y\text{э}}$, Н/мм	1,93	2,20	2,33	T_1^1	T_1^2	T_1^3
	Отсутствие прижогов	600	U, град	220	280	310	T_2^1	T_2^2	T_2^3
	Ra, мкм	0,8	Ra _э , мкм	0,45	0,60	0,71	T_3^1	T_3^2	T_3^3
	Qm, мм/мин	0,123	Qm _э , мм/мин	0,149	0,147	0,143	T_4^1	T_4^2	T_4^3
	Qa, мм/мин	0,002	Qa _э , мм/мин	0,001	0,002	0,006	T_5^1	T_5^2	T_5^3
0,5	Г	5	$R_{y\text{э}}$, Н/мм	2,93	3,80	4,40	T_1^1	T_1^2	T_1^3
	Отсутствие прижогов	600	U, град	400	450	515	T_2^1	T_2^2	T_2^3
	Ra, мкм	0,8	Ra _э , мкм	0,71	1,70	2,21	T_3^1	T_3^2	T_3^3
	Qm, мм/мин	0,123	Qm _э , мм/мин	0,248	0,245	0,240	T_4^1	T_4^2	T_4^3
	Qa, мм/мин	0,002	Qa _э , мм/мин	0,002	0,005	0,009	T_5^1	T_5^2	T_5^3

Таблица 5.1.5 – Карта применимости круга 92AF60L7V 50 м/с

Подача круга $V_{\text{Срэд}}$ мм/мин	Показатель	Время работы круга, мин		
		1	2	3
		Значение логической переменной T		
0,2	$R_{y\text{э}}$, Н/мм	1	1	1
	U, град	1	1	1
	Ra _э , мкм	1	1	1
	Qm _э , мм/мин	0	0	0
	Qa _э , мм/мин	1	1	1
0,3	$R_{y\text{э}}$, Н/мм	1	1	1
	U, град	1	1	1
	Ra _э , мкм	1	1	1
	Qm _э , мм/мин	1	1	1
	Qa _э , мм/мин	1	1	0
0,5	$R_{y\text{э}}$, Н/мм	1	0	0
	U, град	1	0	0
	Ra _э , мкм	1	0	0
	Qm _э , мм/мин	1	1	1
	Qa _э , мм/мин	1	0	0

Сформированные логико-технологические карты для каждого рассматриваемого ШК (таблицы 5.1.2 и 5.1.4) содержат сведения о работоспособности инструмента, а также исходные данные – ограничения, накладываемые на показатели работоспособности. В результате, полученные карты применимости для каждого из рассмотренных ШК показывают режимно-временную область рациональной эксплуатации инструмента, при выполнении им всех требований проектируемой операции шлифования.

5.2. Методика определения периода стойкости шлифовального круга

На протяжении полного периода стойкости абразивный инструмент эксплуатируется с целью достижения разных требований в течение различных периодов стойкости [86]. Известно, что под периодом стойкости ШК следует понимать время работы абразивного инструмента между двумя последовательными правками, в течение которого абразивный инструмент соответствует заданным требованиям [85], при этом, что подразумевается под «заданными требованиями», не уточняется. Диапазон требований, предъявляемых к операции шлифования, может быть различным. Следовательно, у технолога, проектирующего операцию шлифования, возникает дилемма: с одной стороны можно использовать выбранный круг на максимальных режимах обработки, что приведет к быстрому его износу и минимальному периоду его стойкости, но при этом будет достигнут максимальный уровень производительности процесса. С другой стороны, использование круга на максимальных режимах шлифования приведет к более частым правкам, что отрицательно скажется на суммарной норме времени, затрачиваемой на всю партию обрабатываемых деталей. Или, работая ШК на малых подачах, можно обеспечить более продолжительный период его стойкости, что позволит избежать частого появления столь длительного процесса правки и, как следствие, повышенного расхода абразивного инструмента. Выбор того или иного варианта развития событий определяется ограничениями, в том числе и организационными, накладываемыми на проектируемую операцию шлифования. В связи с этим целевая функция (2.2.1) учитывает правку круга. Периодичность правки ШК опреде-

ляется его режущими свойствами, т.е. периодом стойкости, в конкретных технологических условиях.

Рассматривая основное назначение ШК исключительно как производство продукции, отвечающей НТД, в частности, чертежу детали, под периодом стойкости следует понимать промежуток времени, в течение которого конкретный ШК изготавливает детали, соответствующие всем требованиям чертежа. Как только какое-либо требование на операцию перестает выполняться, происходит функциональный отказ инструмента и ШК необходимо править [86].

При проектировании операции шлифования необходимо иметь величину периода стойкости конкретного ШК при его эксплуатации в определенных технологических условиях. Это позволит лучшим образом выполнить нормирование операции, рассчитать прогнозируемый расход инструмента, производительность процесса и т.д.

Приведенные в справочнике нормативов режимов резания средние периоды стойкости ШК представляют собой усредненные производственные данные и не несут практически никакой смысловой нагрузки [218]. Это объясняется тем, что в справочнике не учитывается характеристика инструмента, а также технологические условия его эксплуатации: режимы шлифования, обрабатываемый материал, требования, предъявляемые к операции шлифования и др. Таким образом, величина периода стойкости ШК должна приводиться с указанием его характеристики, условий эксплуатации и требований, предъявляемых к операции шлифования [258].

Методика определения величины периода стойкости приведена в виде алгоритма на рисунке 5.2.1. Для определения величины периода стойкости ШК, прежде всего, необходимо иметь сведения о работоспособности инструмента, представленные, например, в виде его технологического эксплуатационного паспорта [23], либо карты применимости (таблица 5.1.5).



Рисунок 5.2.1 Алгоритм определения величины периода стойкости ШК

Рассмотрим конкретный пример.

В производственных условиях предприятия ООО «ЧТЗ-УралТРАК» для обработки детали «Палец» используется ШК характеристики 24AF60L7V.

Этап 1 (блок 3, рисунок 5.2.1). При помощи системы прогнозных имитационных моделей (пп. 4.2–4.4) прогнозируется работоспособность ШК в технологических условиях, соответствующих условиям обработки детали «Палец». Строится технологический эксплуатационный паспорт данного ШК.

Этап 2 (блок 4, рисунок 5.2.1). Формируется набор требований, предъявляемых к операции шлифования (информация принимается из чертежа детали):

1. Шероховатость Ra – 1,0 мкм.
2. Квалитет IT6.
3. Недопустимость прижогов.

Точность обработки достигается ограничением по нагрузке на деталь со стороны круга. Для достижения точности обработки IT6 средний уровень силы резания (нагрузки на технологическую систему) не должен превышать 3–5 Н/мм [148]. Бесприжоговость может обеспечиваться не только ограничением по предельной температуре, но и максимально допустимой мощностью резания. В нормативах [258] приведены допустимые значения мощности резания, при которых обеспечивается режим бесприжоговой обработки. Для рассматриваемого случая бесприжоговая мощность шлифования составляет 0,1 кВт/мм.

В итоге, сформированный набор ограничений, накладываемых на технологический эксплуатационный паспорт ШК, выглядит следующим образом:

1. Шероховатость Ra – 1,0 мкм.
2. Допустимая нагрузка со стороны круга на ТС – 3 Н/мм.
3. Предельная мощность резания – 0,1 кВт/мм.

Этап 3 (блок 5, рисунок 5.2.1). Наложением сформированного КУП на технологический эксплуатационный паспорт ШК в каждой координатной сетке определяется область возможной эксплуатации инструмента, в которой будет выполняться требование, предъявляемое к конкретному эксплуатационному показателю.

Этап 4 (блок 6, рисунок 5.2.1). В каждой координатной сетке определяется время, в течение которого ШК будет обеспечивать заданное требование качества обработки.

Этап 5 (блок 7, рисунок 5.2.1). Определяется минимальное из всех времен, найденных на этапе 4, которое является периодом стойкости ШК при его эксплуатации на конкретных режимах шлифования.

Графически алгоритм реализован на рисунке 5.2.2.

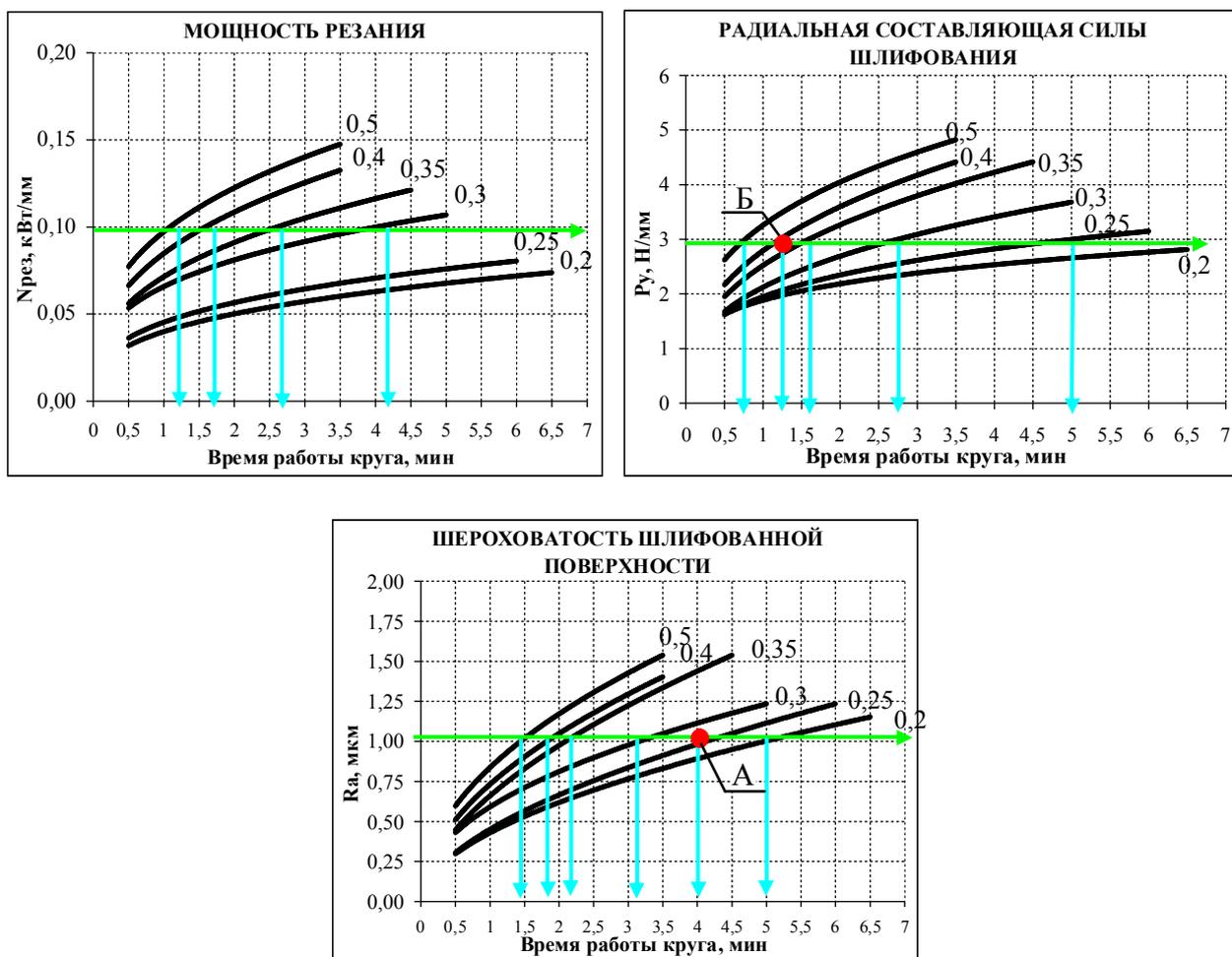


Рисунок 5.2.2 – Определение величины периода стойкости ШК

Рассматривая подачу 0,25 мм/мин видим, что лимитирующим параметром является ограничение по требуемой шероховатости поверхности (т. А). Все остальные показатели качества обработки в течение этого времени будут гарантированно выполняться. Тогда период стойкости круга – $T = 4$ мин. На подаче 0,4 мм/мин лимитирующий параметр – радиальная составляющая силы шлифования и на этой подаче период стойкости круга составляет 1,25 мин.

Таким образом, разработанная методика определения величины периода стойкости ШК позволяет на основе режимно-временной области его эксплуатации, полученной при помощи системы прогнозных моделей, определить величину времени эффективной работы инструмента для широкого диапазона технологических условий его эксплуатации.

5.3. Общий алгоритм методики континуального проектирования операций шлифования

Методика континуального проектирования операций шлифования строится на основе перебора возможных решений реализации обработки при соблюдении ряда ограничений и выполнении целевой функции. Резидентный алгоритм методики приведен на рисунке 5.3.1.

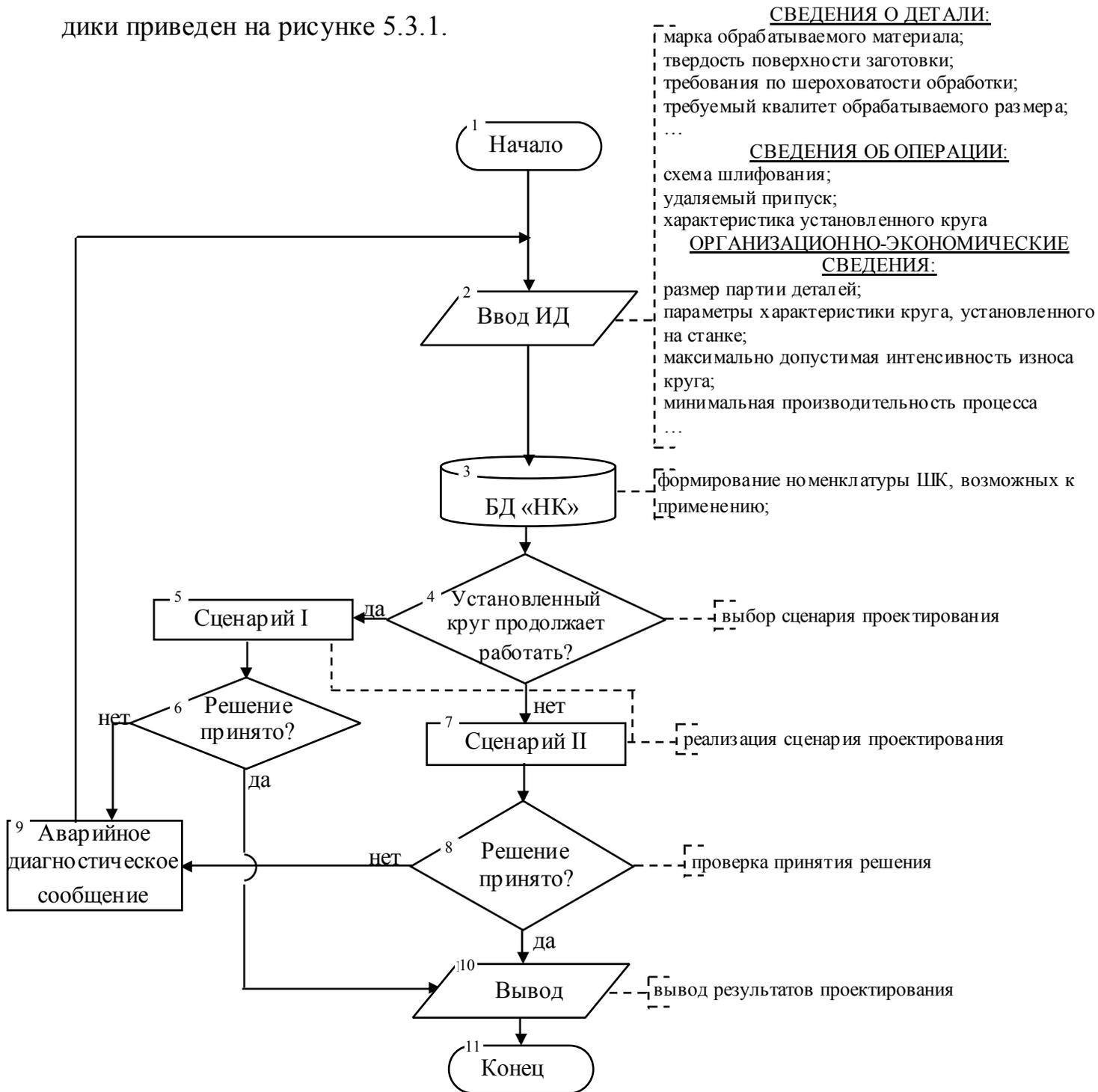


Рисунок 5.3.1 – Резидентный алгоритм методики континуального проектирования операции шлифования

Резидентный алгоритм реализации методики континуального проектирования операций шлифования предусматривает реализацию двух основных сценариев. При этом они не являются взаимоисключающими, т.е. например, после обработки сценария I, в результате которого определяются наиболее эффективные, с точки зрения целевой функции, режимы обработки ШК, установленным на станке, может происходить обработка сценария II. В результате может появиться решение о целесообразности замены установленного круга на другой, более эффективный, даже с учетом временных затрат на его замену, балансировку и правку. Кроме этого, обработка каждого сценария завершается проверкой условия о принятии решения, что определяется возможностью оперативной реализации принятого решения, а именно наличием инструмента выбранной характеристики на предприятии. В случае невозможности реализации принятого решения, выдается аварийное сообщение о необходимости закупки требуемого инструмента. В этом случае временные затраты на доставку инструмента к станку, в цех, на предприятие должны включаться в составляющую целевой функции – T_3 .

В результате реализации резидентного алгоритма методики континуального проектирования операций шлифования, в соответствии с сетевой структурой методики, отраженной на рисунке 2.1.4, определяется режимно-инструментальное оснащение операций, содержащее характеристики ШК, порядок их замены на станке, а также режимы обработки ими различных партий заготовок, подлежащих обработке в планируемом периоде времени.

5.4. Методика проектирования операции шлифования кругом конкретной характеристики (сценарий I)

В многономенклатурном производстве небольшие партии различных заготовок, подлежащие обработке, поступают на станок одна за другой. При этом заготовки могут быть изготовлены из различных материалов, а к готовым деталям предъявляются разные требования по качеству обработки. Следовательно, наиболее распространенной является ситуация, когда ресурс ШК, установленного на станке, полностью не выработан, его эксплуатация допускается НТД [88] и стоит

задача выбора режима шлифования (подачи) ШК конкретной характеристики при обработке различных заготовок.

На рисунке 5.4.1 приведен алгоритм реализации сценария I. Методика проектирования операции шлифования различных деталей кругом конкретной характеристики включает в себя четыре основных этапа.

Этап 1 – прогнозирование работоспособности ШК. Этот этап реализуется на базе предложенной системы прогнозных моделей (пп. 4.2–4.4). Результаты прогнозирования могут быть представлены в виде технологического эксплуатационного паспорта ШК, либо карты применимости инструмента.

Этап 2 – определение времени эффективной эксплуатации инструмента (периода стойкости) на различных режимах шлифования.

Величина времени эффективной эксплуатации является одним из критериев оптимизации, т.к. влияет на целевую функцию (2.2.1) и определяется для каждого режима работы инструмента в области каждого эксплуатационного показателя.

Для определения времени эффективной эксплуатации инструмента используется методика, представленная в виде алгоритма на рисунке 5.2.1. Для этого формируется комплекс условий применимости ШК конкретной характеристики для выполнения требований, предъявляемых к операции шлифования. Комплекс накладывается на работоспособность ШК и для каждого эксплуатационного показателя инструмента, для каждой величины подачи выделяется режимно-временная область возможной эксплуатации данного ШК, с выполнением инструментом всех ограничений, предъявляемых к операции шлифования.

На рисунке 5.4.2 приведен фрагмент технологического эксплуатационного паспорта ШК, полученного в результате применения прогнозных моделей.

К выполняемой операции шлифования предъявляются следующие основные требования (из чертежа детали):

1. Шероховатость R_a – 1,0 мкм.
2. Качество размера – IT6.

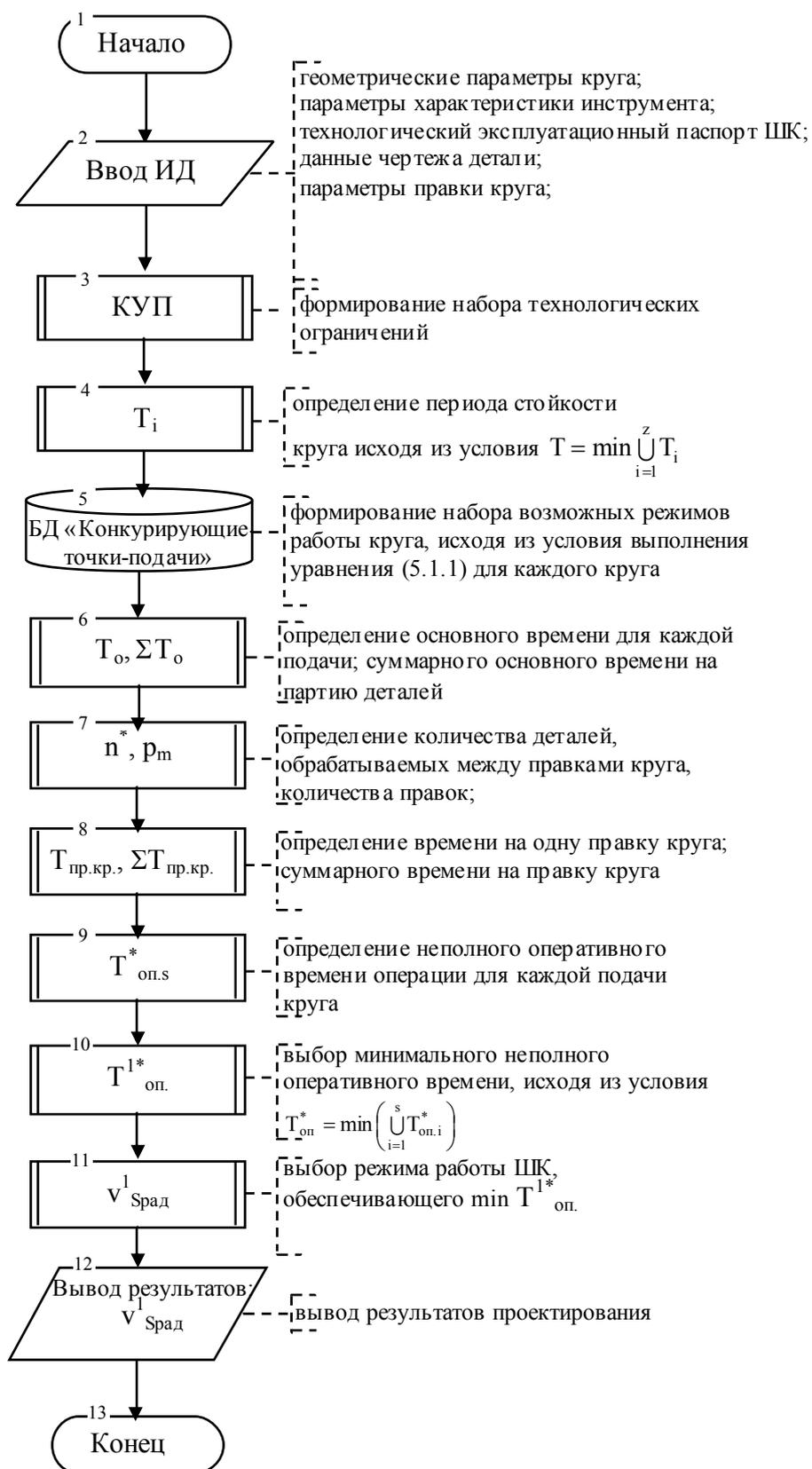


Рисунок 5.4.1 – Алгоритм реализации сценария I
«Проектирование операции шлифования кругом конкретной характеристики»

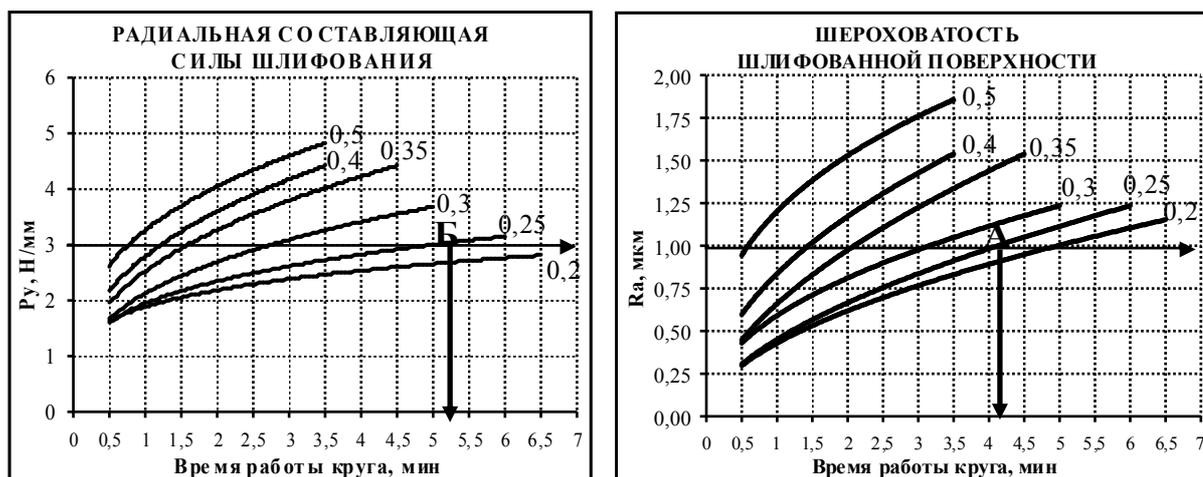


Рисунок 5.4.2 – Определение периода стойкости ШК характеристики 24AF60L7V по его технологическому эксплуатационному паспорту

Шероховатость поверхности принимается из чертежа детали. Точность обработки достигается ограничением по нагрузке на деталь со стороны круга. Для достижения точности обработки IT6 средний уровень силы резания (нагрузки на технологическую систему) не должен превышать 3–5 Н/мм [148].

Комплекс ограничений, накладываемых на технологический эксплуатационный паспорт ШК:

1. Шероховатость Ra – 1,0 мкм.
2. Радиальная составляющая силы шлифования – 3,5 Н/мм.

Накладывая комплекс ограничений на технологический эксплуатационный паспорт ШК, получаем область эффективной его эксплуатации, в которой будет выполняться требование, предъявляемое к конкретному эксплуатационному показателю. В каждой координатной сетке определяется время, в течение которого ШК будет обеспечивать заданное требование качества обработки. Минимальное из всех времен является периодом стойкости ШК для данных условий его эксплуатации, а параметр – лимитирующим. Так, на подаче 0,25 мм/мин по критерию обеспечения точности обработки период стойкости составляет 5,2 мин, по критерию обеспечения шероховатости поверхности – 4,1 мин. Следовательно, лимитирующим параметром является ограничение по требуемой шероховатости поверхности (т. А), а период стойкости круга – $T = 4,1$ мин.

В случае, если ограничение не пересекает график какого-либо показателя, это значит, что в качестве критической точки принимается конечное время прогнозирования.

Этап 3 – получение массива конкурирующих точек – возможных режимов шлифования (подач). Определение периодичности и количества правок, необходимых для изготовления всей партии деталей.

Полученные из рисунка 5.4.2 данные сведены в таблицу 5.4.1.

Таблица 5.4.1 – Результаты нормирования операции шлифования (этап 3)

Кол-во деталей в партии, шт.	Припуск, мм	Подача, мм/мин	T_0 , мин	T , мин	n^* , шт.	ΣT_0 , мин	$\rho_{\text{п}}$, шт.	$T_{\text{пр.кр.}}$, мин	$\Sigma T_{\text{пр.}}$, мин	$T_{\text{нв}}^*$, мин
100	0,15	0,2	0,75	5,00	6	75,00	17	1,5	25,5	100,50
		0,25	0,60	4,10	6	60,00	17	1,5	25,5	85,50
		0,3	0,50	3,20	6	50,00	17	1,5	25,5	75,50
		0,35	0,43	2,10	4	42,86	25	1,5	37,5	80,36
		0,4	0,38	1,40	3	37,50	34	1,5	51	88,50
		0,5	0,30	0,70	2	30,00	50	1,5	75	105,00

В результате получается массив конкурирующих точек (1–6 на рисунке 5.4.3.) – скоростей подачи круга, каждая из которых обеспечивает определенный период стойкости инструмента, в пределах которого выполняются все требования чертежа готовой детали.

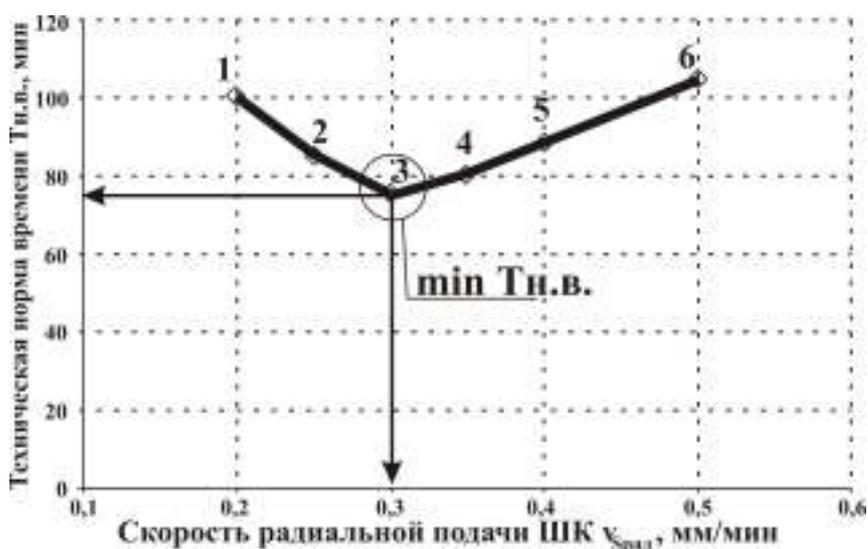


Рисунок 5.4.3 – Определение режима шлифования, обеспечивающего выполнение требований чертежа детали и минимума технической нормы времени

Этап 4 – выбор рационального режима шлифования (подачи).

Для данного ШК из массива конкурирующих точек – режимов шлифования, выбирается та, при которой рассматриваемый ШК обеспечивает выполнение всех требований (ограничений), предъявляемых к проектируемой операции шлифования и выполнение целевой функции (2.2.1). Так, на подаче 0,35 мм/мин суммарное основное время меньше примерно на 15 %, в сравнении с подачей 0,3 мм/мин. Вместе с тем, за счет повышения производительности, увеличивается интенсивность износа круга, уменьшается количество деталей, изготовленных между правками, а также увеличивается частота правок. Следовательно, для заданных технологических условий выполнения операции шлифования скорость радиальной подачи 0,3 мм/мин является рациональной: она обеспечит как выполнение всех требований чертежа детали, так и выполнение целевой функции (2.2.1), т.е. максимально возможный уровень производительности процесса кругом конкретной характеристики.

5.5. Методика выбора пары «характеристика ШК – режим шлифования» (сценарий II)

В случае отработки сценария I, когда назначаются режимы шлифования новой партии деталей ШК, установленным на станке, имеется возможность проверить возможность его замены на круг другой характеристики, обеспечивающей меньшие временные затраты на выполнение операции, даже с учетом времени на замену круга, его балансировку и правку. Это предусматривается сценарием II.

Кроме этого, в случае, когда круг, установленный на станке, выработал свой ресурс полностью и должен быть заменен, возникает задача выбора характеристики ШК, которая бы в большей мере была оптимальной для обработки партии деталей, поступающей на станок. При этом одновременно назначается наиболее эффективный режим шлифования, обеспечивающий выполнение уравнения (5.1.1) и целевой функции (2.2.1). Для этого необходимо иметь базу данных по эксплуатационным возможностям ШК различных характеристик, работающих в изменяющихся технологических условиях, либо возможность прогнозирования

показателей работоспособности инструмента. Выбор ШК производится путем сопоставления их эксплуатационных возможностей по обеспечению требований чертежа детали и выполнению целевой функции.

Начальный этап проектирования подразумевает формирование номенклатуры ШК, которые рекомендуются к обработке данной партии деталей. Номенклатура формируется в соответствии со справочными рекомендациями, которыми располагает предприятие, при этом рассматриваются различные варианты, в т.ч. доступные у предприятий-поставщиков абразивной продукции. В дальнейшем, выбор конкретного ШК осуществляется из сформированной выборки. На рисунке 5.5.1. показан алгоритм отработки сценария II.

Сценарий II подразумевает замену ШК на станке, поэтому сравнение кругов различных характеристик производится по целевой функции, которая учитывает временные затраты на транспортировку инструмента в цех, к станку.

Предположим, что в номенклатуру инструмента, рекомендованного к применению для обработки партии деталей, поступающих на станок в ближайшее время, входят ШК № 1, 2 и 3. Номенклатура ШК формируется на основе существующих рекомендаций [218, 219 и др.].

Например, к выполняемой операции шлифования предъявляются следующие требования:

1. Требуемая по чертежу шероховатость R_a – 1,25 мкм.
2. Точность обработки IT6.

Комплекс ограничений, накладываемый на технологический эксплуатационный паспорт ШК:

1. Шероховатость R_a — 1,25 мкм.
2. Допустимая нагрузка со стороны круга на ТС – 4 Н/мм [148].

Методика выбора характеристики инструмента включает в себя 3 этапа.

Этап 1. По разработанной методике (п. 5.2) определяется период стойкости каждого ШК для каждого режима его эксплуатации. Накладывая на сведения о работоспособности инструмента комплекс ограничений по точности обработки и шероховатости поверхности, получаем режимно-временную зону эксплуатации

каждого ШК. Результаты определения периода стойкости каждого из трех рассматриваемых кругов приведены в таблице 5.5.1.

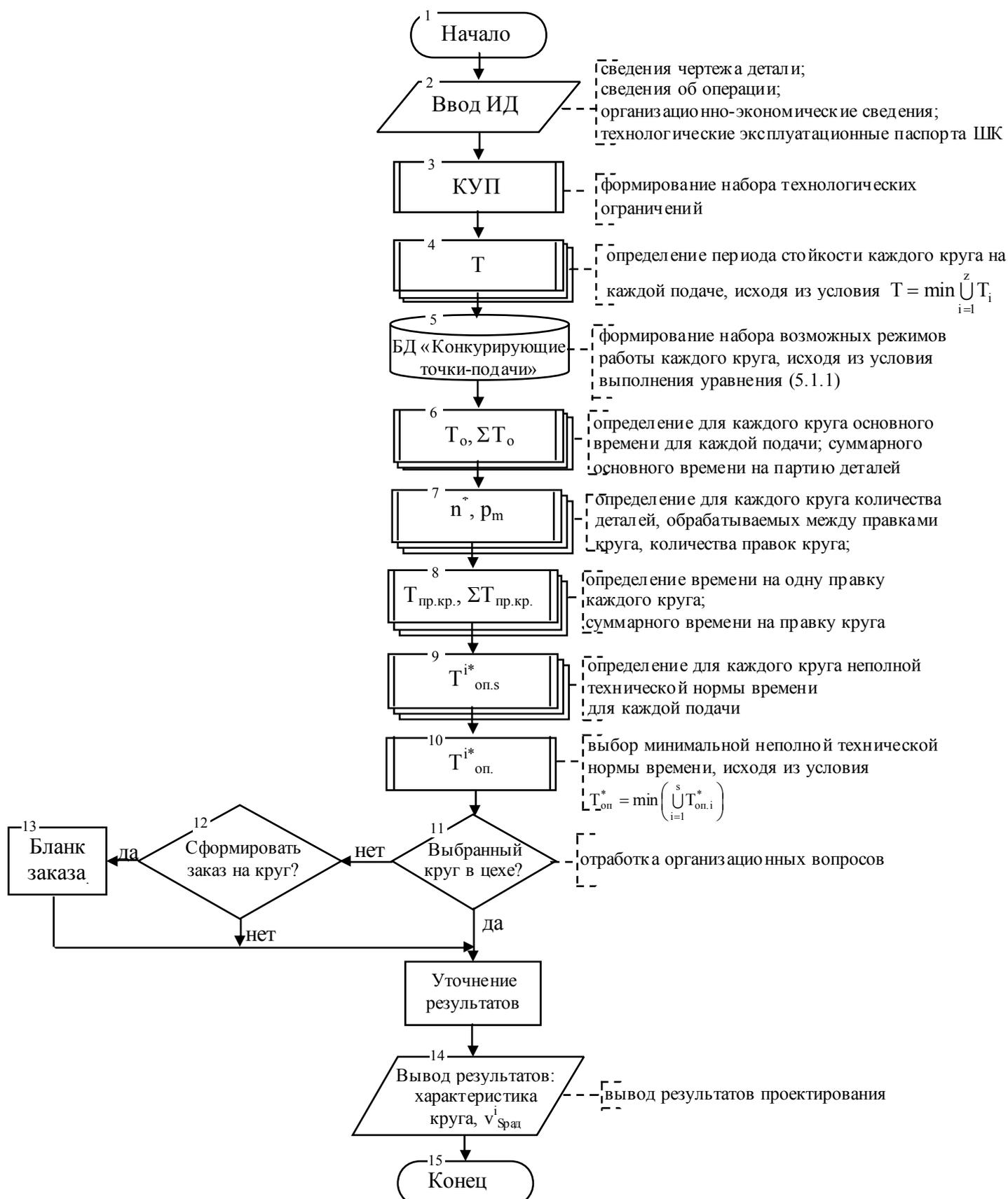


Рисунок 5.5.1 – Алгоритм реализации сценария II «Подбор пары «характеристика ШК – режим шлифования»

Таблица 5.5.1 – Результаты нормирования операции шлифования

Кол-во деталей в партии	Припуск, мм	№ круга	Подача, мм/мин	T _о , мин	T, мин	n*, шт	ΣT _о , мин	p _т , шт	T _{пр.кр.} , мин	ΣT _{пр.} , мин	T* _{нв.} , мин
100	0,30	1	0,2	2,50	6,50	2	250,0	50	1,5	75	325,00
			0,25	2,00	6,00	3	200,0	34	1,5	51	251,00
			0,3	1,67	5,00	3	166,6	34	1,5	51	217,67
			0,35	1,43	2,20	1	142,8	100	1,5	150	292,86
			0,4	1,25	1,50	1	125,0	100	1,5	150	275,00
			0,5	1,00	1,10	1	100,0	100	1,5	150	250,00
		2	0,2	2,50	9,00	3	250,0	34	1,5	51	301,00
			0,25	2,00	7,00	3	200,0	34	1,5	51	251,00
			0,3	1,67	6,00	3	166,6	34	1,5	51	217,67
			0,35	1,43	5,00	3	142,8	34	1,5	51	193,86
			0,4	1,25	5,00	4	125,0	25	1,5	37,5	162,50
			0,5	1,00	1,50	1	100,0	100	1,5	150	250,00
		3	0,2	2,50	5,50	2	250,0	50	1,5	75	325,00
			0,25	2,00	5,00	2	200,0	50	1,5	75	275,00
			0,3	1,67	4,00	2	166,6	50	1,5	75	241,67
			0,35	1,43	3,50	2	142,8	50	1,5	75	217,86
			0,4	1,25	2,50	2	125,0	50	1,5	75	200,00
			0,5	1,00	1,00	1	100,0	100	1,5	150	250,00

Этап 2. Для каждого ШК выбирается оптимальный режим его работы – обеспечивающий выполнение целевой функции (2.2.1) в пределах каждого периода стойкости ШК. Результаты выбора режима шлифования для каждого круга сведены в таблицу 5.5.1.

Для каждого ШК выбирается рациональный режим шлифования, обеспечивающий выполнение целевой функции (2.2.1) при обработке партии деталей, поступающей на станок. Для круга № 1 это 0,3 мм/мин, для кругов № 2 и 3 – 0,4 мм/мин.

Этап 3. Из рассматриваемых ШК выбирается тот, который обеспечивает минимум целевой функции (2.2.1).

В итоге получаем, что рациональным ШК является круг № 2, т.к. он обеспечивает выполнение целевой функции (2.2.1) и уравнения (5.1.1). Круги № 1 и 3 обеспечивают обработку меньшего количества деталей между правками и, как следствие, требуют более частых правок, вызванных меньшим периодом стойко-

сти инструмента. Это делает данные ШК менее пригодными к применению в конкретных условиях в сравнении с кругом № 2.

На рисунке 5.5.2 графически показан выбор рациональной характеристики ШК и режима шлифования по данным таблицы 5.5.1.

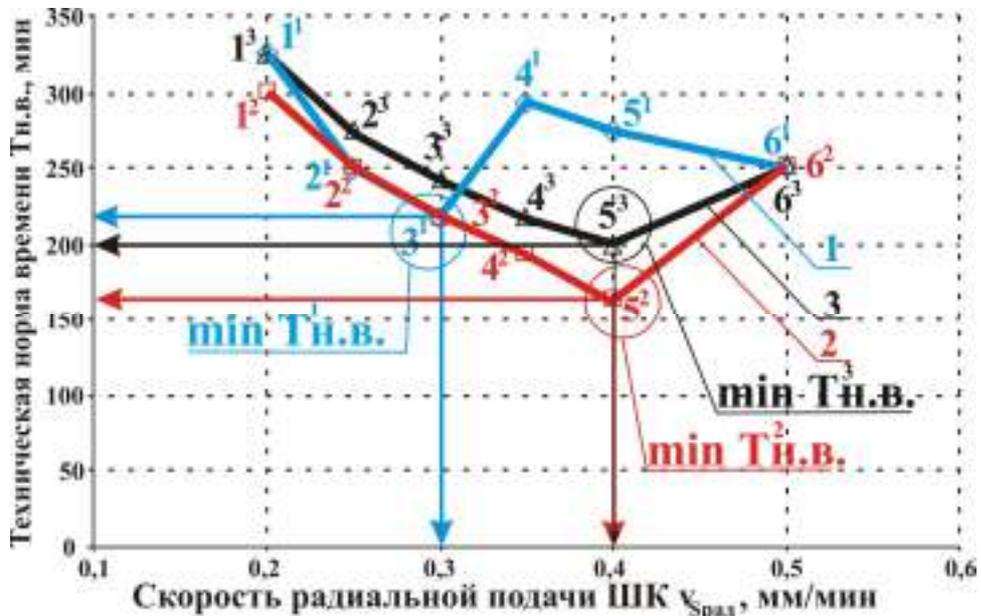


Рисунок 5.5.2 – Выбор пары «характеристика ШК–режим шлифования», обеспечивающей выполнение требований чертежа детали и целевой функции: 1 – круг № 1; 2 – круг № 2; 3 – круг № 3

После выполнения этапа 1 на кривой каждого круга появляются конкурирующие точки – различные режимы обработки, на которых обеспечивается выполнение всех требований, предъявляемых к обработанной детали (для кругов № 1, 2 и 3 – соответственно с индексом 1, 2 и 3). Для каждого ШК определяется оптимальный режим его работы: для круга № 1 – точка 3¹ (0,3 мм/мин), для круга № 2 – точка 5² (0,4 мм/мин), для круга № 3 – 5³ (0,4 мм/мин).

В итоге, из конкурирующих точек выбирается та, которая обеспечивает выполнение условия (5.1.1), в данном случае это точка 5², относящаяся к ШК № 2, причем одновременно с этим определяется наиболее эффективный режим его работы – 0,4 мм/мин.

Для последующих партий заготовок описанная процедура повторяется. После полного перебора всех возможных сочетаний «характеристика ШК – обрабатываемая заготовка» формируется порядок замены ШК на станке при обработке всех партий разных заготовок в планируемом периоде времени.

5.6. Модуль технологической подготовки «T&Tool»

Реализация методики континуального проектирования операций шлифования возможна с применением современных персональных компьютеров. Для этого было создано алгоритмическое (см. пп. 5.3–5.5) и информационное обеспечение, а также интерфейс модуля «T&Tool», который приведен на рисунке 5.6.1.

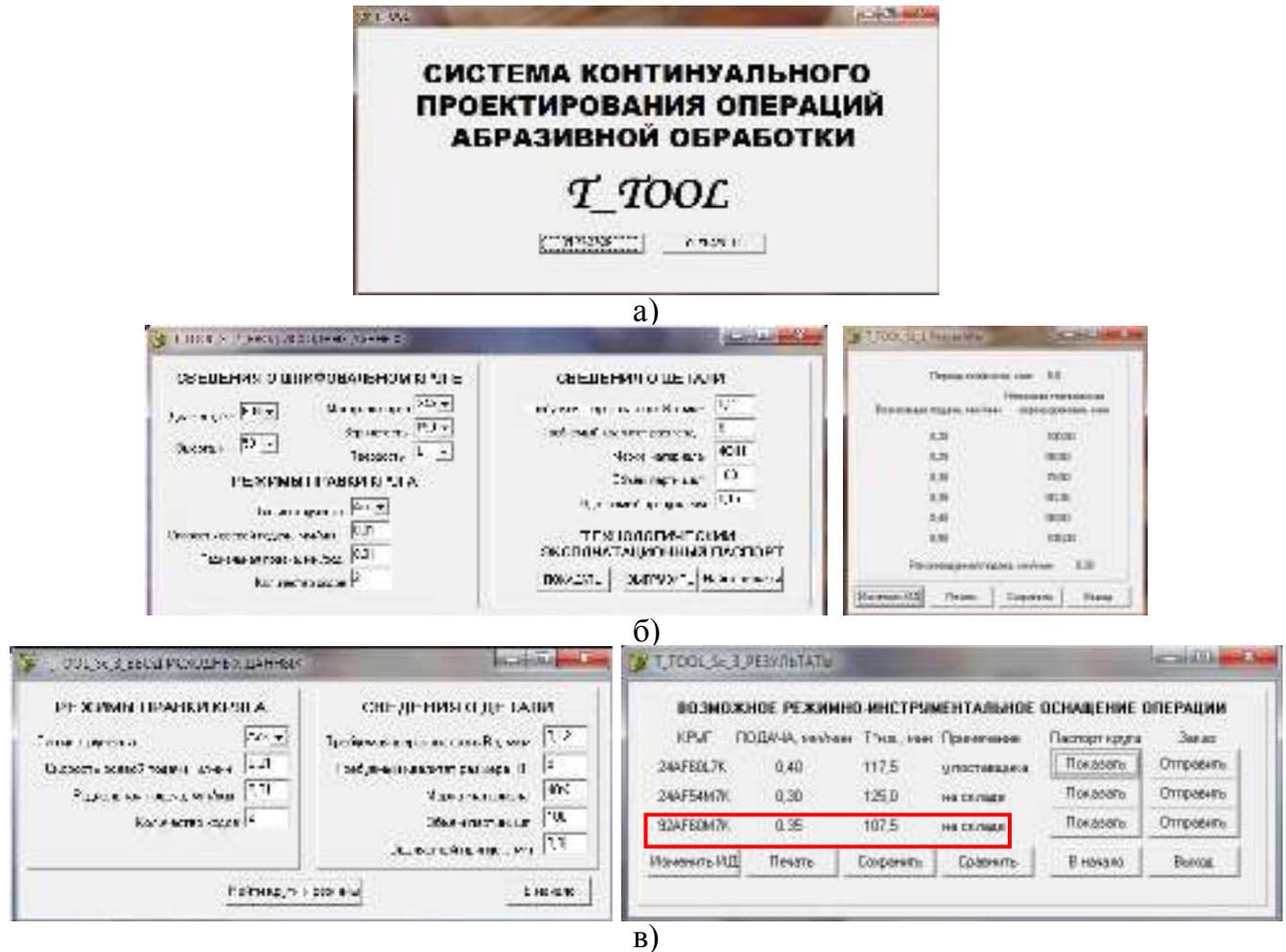


Рисунок 5.6.1. Интерфейс модуля технологической подготовки «T&Tool»: а) стартовый экран; б) сценарий I; в) сценарий II

Стартовый экран предоставляет пользователю выбрать сценарий, для реализации которого будет выполняться проектирование. После этого, отработывается соответствующий алгоритм. Интерфейс пакета реализован на языке Borland Delphi и позволяет пользователю не только получить результаты проектирования, но также промежуточные результаты, такие как технологический эксплуатационный паспорт круга, либо результаты сравнения инструментов при их выборе в виде графиков.

Реализация сценария I требует от пользователя ввода исходных данных – сведений о ШК, требований, предъявляемых к готовой детали, режимов правки и др. После этого пользователю предоставляется возможность выгрузки и анализа технологического эксплуатационного паспорта рассматриваемого инструмента. Сведения об эксплуатационных возможностях ШК различных характеристик хранятся в базе данных системы и периодически пополняются, обновляются по результатам прогнозирования эксплуатационных показателей. В дальнейшем, имеется возможность определения рациональных режимов шлифования кругом, указанной характеристики, при этом на экране результатов (рисунок 5.6.1, б) выводятся данные нормирования операции шлифования по выполнению сценария I.

При вводе исходных данных для реализации сценария II необходима информация о требованиях, предъявляемых к готовой детали, об условиях реализуемой операции шлифования и сведения о правке инструмента, применяемой на станке (рисунок 5.6.1, в). На следующем экране даются сведения о ШК, имеющихся в распоряжении и рекомендованных для партии заготовок, запланированной к обработке. На этом этапе пользователю предоставляется возможность выбора того или иного варианта развития событий: он может выбрать ШК, обеспечивающий не самый лучший уровень производительности процесса, но в итоге обработка этим кругом будет более выгодна, чем кругом, отсутствующим на складе предприятия и имеющимся только у поставщика абразивной продукции.

Для реализации вариативного характера методики для каждой партии заготовок, запланированной к обработке в ближайшее время, отрабатывается сценарий II. В результате формируется порядок замены ШК на станке, при этом уже известен режим шлифования каждым кругом каждой партии заготовок.

5.7. Выводы

1. Разработана методика определения величины периода стойкости шлифовального круга.
2. Разработана инженерная методика континуального проектирования операций шлифования в условиях многономенклатурного производства, в которой

выделены два основных сценария развития производственной ситуации: обработка всех заготовок, поступающих на станок кругом, установленным на станке, а также выбор и определение порядка замены инструмента на станке для обработки партий заготовок, планируемых к поступлению на станок в течение определенного периода времени. При этом одновременно для обработки каждой партии заготовок определяется характеристика ШК и режим шлифования.

3. Для реализации каждого сценария проектирования разработана методика, реализованная в виде алгоритма.

4. Разработан способ представления сведений о работоспособности ШК в виде карты применимости инструмента.

5. Разработано алгоритмическое и информационное обеспечение модуля технологической подготовки «T&Tool», позволяющего выполнять реализацию любого из разработанных сценариев проектирования операции шлифования.

Глава 6. Практическая реализация методики континуального проектирования операций шлифования

6.1. Оценка работоспособности шлифовальных кругов

Оценка работоспособности абразивного инструмента, как показано выше, должна осуществляться с обязательной привязкой к условиям его эксплуатации и должна учитывать не только характеристику инструмента в соответствии с нормативной документацией, но и условия реализации операции: материал обрабатываемой заготовки, требования чертежа готовой детали, схему шлифования, марку применяемого СОТС и др.

Учитывая слабый уровень работоспособности существующих методик проектирования операций шлифования [218, 219], современное справочное сопровождение системы подготовки производства видится в компьютерных пакетах, осуществляющих прогнозирование работоспособности абразивных инструментов в различных технологических условиях и проектирование операций шлифования, основанное на этом прогнозировании. Такое сопровождение может быть реализовано в виде набора технологических эксплуатационных паспортов ШК, либо карт применимости (см. п. 5.1), объединенных по маркам обрабатываемых материалов или по маркам абразивного материала.

Таким образом, информация о работоспособности абразивных инструментов позволит существенно повысить эффективность операций шлифования, проектируемых конечным пользователем. Также это обстоятельство повысит конкурентоспособность абразивной продукции на мировом рынке

6.2. Повышение эффективности операций абразивной обработки

6.2.1. Повышение эффективности эксплуатации инструмента конкретной характеристики в различных технологических условиях

В условиях отдела алмазного и абразивного инструмента ОАО «Автоваз» производится накопление и систематизация производственного опыта по эксплуатации всех абразивных и алмазных инструментов, поступающих на предприятие

для использования, с целью разработки внутренних рекомендаций по эффективной эксплуатации инструментов.

В соответствии с этой информацией, для обработки заготовок из сталей 20ХГНМ и 19ХГН и достижения различной шероховатости и точности обработки рекомендуется круг характеристики 24AF46K и различные режимы обработки, которые взяты из технологической документации, заполненной по результатам производства опытных партий. Аналогичная ситуация и при обработке заготовок из сталей 10, 45, 15ХГН2, 15ХГН2ТА и серого чугуна марки СЧ-20. Эти марки материалов принадлежат к различным группам обрабатываемости и для их обработки нужно использовать круги различных характеристик, однако в соответствии с рекомендациями предприятия их предписывается обрабатывать ШК характеристики 24AF54L на соответствующих режимах обработки.

Для указанных условий, в соответствии с разработанной методикой выполнено проектирование операции, т.е. отработан сценарий I. Полученные данные сведены в таблицу 6.2.1 и показаны на рисунке 6.2.1.

Таблица 6.2.1. Сопоставление производственных данных ОАО «Автоваз» и результатов проектирования

Круг	Марка обр.мат., ГрОМ	Данные техпроцесса			Результаты расчета		Снижение T _о , %
		П, мм	V _{Срэд} , мм/мин	T _о , мин	V _{Срэд} , мм/мин	T _о , мин	
24AF46K	20ХГНМ, III	0,50	0,12	4,17	0,15	3,33	20
		0,35	0,31	1,13	0,40	0,88	23
		0,35	0,31	1,13	0,40	0,88	23
	19ХГН, I	0,30	0,25	1,20	0,30	1,00	17
		0,50	0,15	3,33	0,35	2,50	25
		0,30	0,25	1,20	0,30	1,00	17
24AF54L	45, I	0,20	0,13	1,54	0,15	1,33	13
		0,70	0,60	1,17	0,65	1,08	8
		0,30	0,80	0,38	0,80	0,38	0
	35, I	0,30	0,62	0,48	0,65	0,46	5
		0,20	0,12	1,67	0,15	1,33	20
	15ХГН2ТА, III	0,30	0,16	1,88	0,20	1,50	20
		0,15	0,40	0,38	0,40	0,38	0
		0,50	0,25	2,00	0,25	2,00	0
	10, II	0,40	0,31	1,29	0,40	1,00	23
		0,40	0,40	1,00	0,40	1,00	0
	СЧ-20	0,30	0,20	1,50	0,25	1,20	20

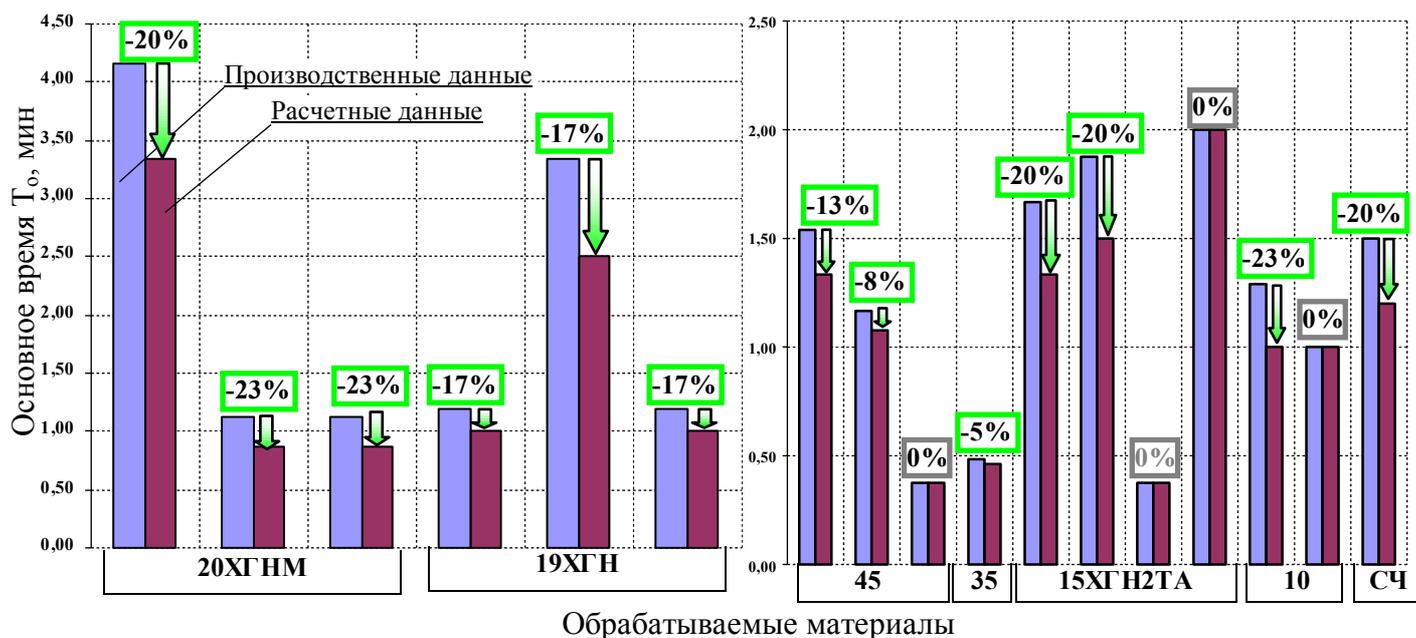


Рисунок 6.2.1. Сопоставление производственных и расчетных данных по эксплуатации ШК

Из таблицы 6.2.1 видно, что полученные в результате проектирования режимы шлифования снижают основное время обработки заготовки на 8...23 %, что является существенным результатом и открывает новые резервы для повышения производительности в целом. Вместе с этим обращает на себя внимание тот факт, что в некоторых случаях производственный режим шлифования совпадает с результатом проектирования или отличается незначительно – на 5...10 %. Это говорит об адекватности разработанной методики и отсутствии противоречий опытными данными предприятия, а также о том, что ресурс работоспособности абразивного инструмента в этих случаях используется максимально эффективно.

6.2.2. Выбор пары «характеристика ШК – режим шлифования»

Также были рассмотрены операции круглого врезного шлифования заготовок, изготовленных из закаленной стали 40Х, для реализации которых рекомендованы круги характеристик 24AF60L и 24AF54M. Смена ШК продиктована различными техническими требованиями, предъявляемыми к готовым деталям. Исходные данные приведены в таблице 6.2.2 (по данным техпроцессов ПАО «Уралмашзавод»).

Таблица 6.2.2. Исходные данные для выполнения операции шлифования

№ партии	Характеристика круга	Материал заготовки	Требуемая шероховатость Ra, мкм	Требуемый квалитет размера, IT	Режим шлифования $v_{\text{Срад}}$, мм/мин
1	24AF60L	Сталь 40X	2,0	6	0,60
2	24AF54M		1,6	7	0,54

Если следовать указанным в таблице рекомендациям, то после обработки первой партии деталей, необходимо заменить установленный на станке ШК на другой, отличающийся зернистостью и твердостью. При этом будут выполнены действия, связанные с балансировкой и многократной правкой нового круга. Для этого единица промышленного оборудования будет выведена из производства на период 14...16 минут [216].

Отработка сценария II выполнена в условиях ПАО «Уралмашзавод» для обработки валов моторных. В соответствии с разработанной методикой реализовано прогнозирование работоспособности ШК указанных характеристик. Результаты расчета приведены в таблице 6.2.3. В таблице выделена зона возможной эксплуатации круга рассматриваемой характеристики по двум ограничениям – силе шлифования и шероховатости. Требования по точности размера будут выполнены при не превышении силы шлифования $P_y = 50$ Н [148].

Таблица 6.2.3. Результаты прогнозирования эксплуатационных показателей ШК характеристики 24AF54M

Время работы круга, мин	Радиальная составляющая силы шлифования P_y , Н				Шероховатость поверхности Ra, мкм			
	Скорость радиальной подачи круга $v_{\text{Срад}}$, мм/мин							
	0,2	0,3	0,5	0,8	0,2	0,3	0,5	0,8
	Значение показателя							
1,0	35	38	40	51	1,00	1,25	1,45	1,50
2,0	37	39	42	55	1,12	1,27	1,48	1,52
3,0	41	43	43	58	1,22	1,32	1,51	1,54
4,0	43	44	46	60	1,26	1,39	1,55	1,60
5,0	45	47	49	63	1,29	1,44	1,58	1,65
6,0	48	49	52	65	1,34	1,47	1,62	1,73
7,0	51	53	55	69	1,45	1,51	1,66	1,88

Из таблицы 6.2.3 видно, что обе партии деталей можно обработать ШК одной характеристики – 24AF54M. При этом следует отметить, что уровень производительности самого процесса обработки будет ниже, т.к. подача, которая ограничивается требованиями по точности размера составляет 0,5 мм/мин. Однако падение уровня производительности на одну деталь, учитывая припуск, указанный в технологической карте, составит всего 16 %. При этом увеличение технической нормы времени на изготовление всей партии деталей (100 шт.) составляет порядка 5 % в сравнении с рекомендациями техпроцесса. Результаты нормирования операции шлифования показаны на рисунке 6.2.2.

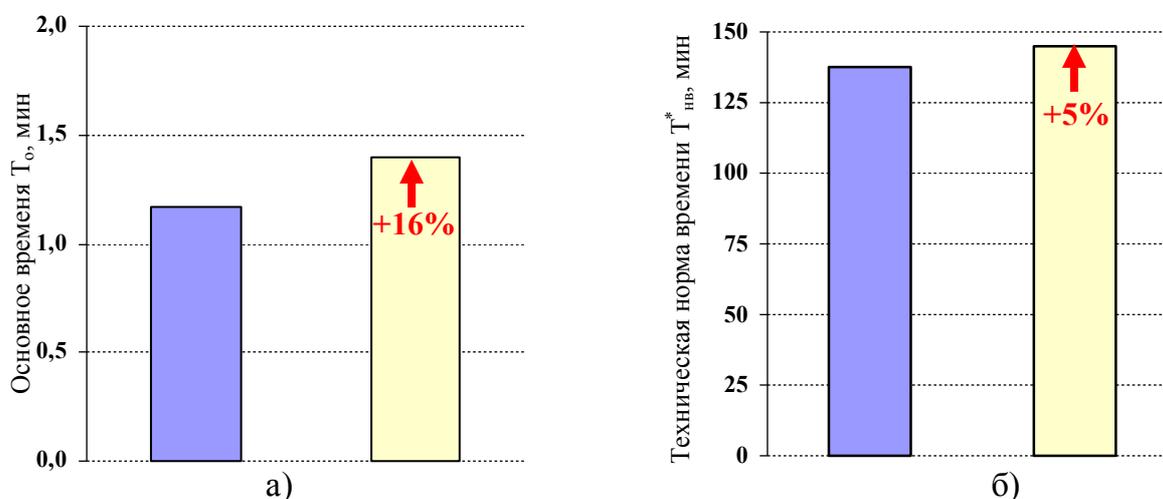


Рисунок 6.2.2. Результаты отработки сценария II:
 а) сравнение основного времени; б) сравнение технической нормы времени
 ■ по техпроцессу ■ по расчету

Полученное увеличение технической нормы времени крайне незначительно, учитывая тот факт, что при обработке последующей партии заготовок кругом уже установленным на станке отпадает необходимость в проведении манипуляций по замене абразивного инструмента. В результате сокращается трудоемкость операции, расход абразивного инструмента, ведь больше всего абразивного материала ШК расходуется на его предварительную правку в процессе установки на станок. Кроме того отпадает необходимость в приобретении ШК характеристики, отличающейся от имеющейся, что позволяет избежать дополнительных затрат на хранение и транспортирование инструмента.

Проиллюстрируем сказанное выше расчетом себестоимости выполнения операции по изготовлению всей партии деталей.

В общем случае, технологическая себестоимость C_T изготовления партии деталей состоит из переменных ($C_{\text{пер}}$) и постоянных ($C_{\text{пост}}$) затрат [124]:

$$C_T = n \cdot C_{\text{пер}} + C_{\text{пост}}, \quad (6.2.1)$$

При этом переменная часть себестоимости $C_{\text{пер}}$ выполнения операции шлифования может быть определена по формуле [124]

$$C_{\text{пер}} = C_M + C_a + C_э, \quad (6.2.2)$$

где C_M – затраты на удаление металла с обрабатываемой заготовки, руб; C_a – затраты, связанные с износом ШК, руб; $C_э$ – затраты на электроэнергию, руб.

Составляющие формулы (6.2.2) могут быть определены как [124]

$$C_M = T_o (C_{з.п.} + C_{ст}) = T_o \left(C_{з.п.} + \frac{C_б \cdot a_m}{\Phi_r \cdot k_{з.с.}} \right), \quad (6.2.3)$$

где $C_{з.п.}$ – минутная заработная плата рабочего, руб; $C_{ст}$ – стоимость одной станкоминуты, руб; $C_б$ – балансовая стоимость станка и оснастки, руб; a_m – норма годовых амортизационных отчислений, руб; Φ_r – годовой фонд рабочего времени, мин; $k_{з.с.}$ – коэффициент загрузки станка.

$$C_a = C_{пр} + C_{изн} = \frac{T_o}{T} \left(\left(C_{з.п.} + \frac{C_б \cdot a_m}{\Phi_r \cdot k_{з.с.}} \right) T_{пр} + \frac{4W_{пр} C_k}{\pi B_k (D_{к0}^2 - D_{ки}^2)} \right) + \left(\frac{4T_o W_{а.к.} C_k}{\pi B_k (D_{к0}^2 - D_{ки}^2) T} \right), \quad (6.2.4)$$

где $C_{пр}$ – затраты на правку ШК, руб; $C_{изн}$ – затраты, связанные с износом круга в процессе обработки, руб; $T_{пр}$ – время, затраченное на правку ШК, мин; $W_{пр}$ – объем части ШК, удаленный при его правке, мм³; C_k – стоимость ШК, руб.

Время, затрачиваемое на правку ШК [258]:

$$T_{пр.} = \frac{B_{пр.} \cdot D_k \cdot i}{v_{Soc} \cdot k_{vSoc1} \cdot k_{vSoc2} \cdot 5 \cdot 10^6}, \quad (6.2.5)$$

где $B_{пр.}$ – длина рабочего хода правящего инструмента, мм; i – общее количество ходов правящего инструмента; v_{Soc} – скорость осевой подачи правящего инструмента, мм/мин; k_{vSoc1} – поправочный коэффициент на скорость осевой подачи правящего инструмента в зависимости от твердости ШК; k_{vSoc2} – поправочный коэффициент на скорость осевой подачи правящего инструмента в зависимости от скорости ШК.

Объем части ШК, удаленный при его правке может быть определен по формуле:

$$W_{\text{пр.}} = \pi D_k B_k h_{\text{пр.}}, \quad (6.2.6)$$

где $h_{\text{пр}}$ – суммарная глубина правки, мм.

$$C_3 = \frac{T_o c_3 N_{\text{рез}}}{60}, \quad (6.2.7)$$

где c_3 – тариф на 1 кВт электроэнергии, руб/кВт.

Величина постоянных затрат определяется по формуле:

$$C_{\text{пост}} = C_{\text{осн}} + C_{\text{пз}} + C_{\text{скл}}, \quad (6.2.8)$$

где $C_{\text{осн}}$ – затраты на эксплуатацию специальной оснастки (в настоящем расчете принимается, что спецоснастка не используется), руб; $C_{\text{пз}}$ – затраты, связанные с приобретением круга и подготовительно-заключительным временем, руб; $C_{\text{скл}}$ – затраты на обслуживание кругов на складе (принимались в размере 10 % от стоимости инструмента), руб.

$$C_{\text{пз}} = C_{\text{ст}} \cdot k \cdot T_3, \quad (6.2.9)$$

где k – количество замен ШК; T_3 – время, затрачиваемое на замену ШК на станке, мин.

Для приведенных в таблице 6.2.2 исходных данных, по формулам (6.2.1) – (6.2.9) был выполнен расчет технологической себестоимости обработки партий различных деталей. При этом рассмотрено 2 варианта обработки партии № 2: ШК, отличающимся от установленного на станке, как рекомендует технологический процесс, а также обработка ШК одной характеристики, имеющимся на станке в соответствии с расчетами. Результаты расчета приведены в таблице 6.2.4 и на рисунках 6.2.3, 6.2.4.

Таблица 6.2.4. Результаты расчета себестоимости

Параметр, руб.	По ТП		По расчету	
	на 1 деталь	на партию	на 1 деталь	на партию
$C_{\text{пер}}$	16,18	4045,70	19,42	4855,13
$C_{\text{пост}}$	91,16	6067,16	71,16	1000,00
$C_{\text{т}}$	107,34	10112,86	90,58	5855,13

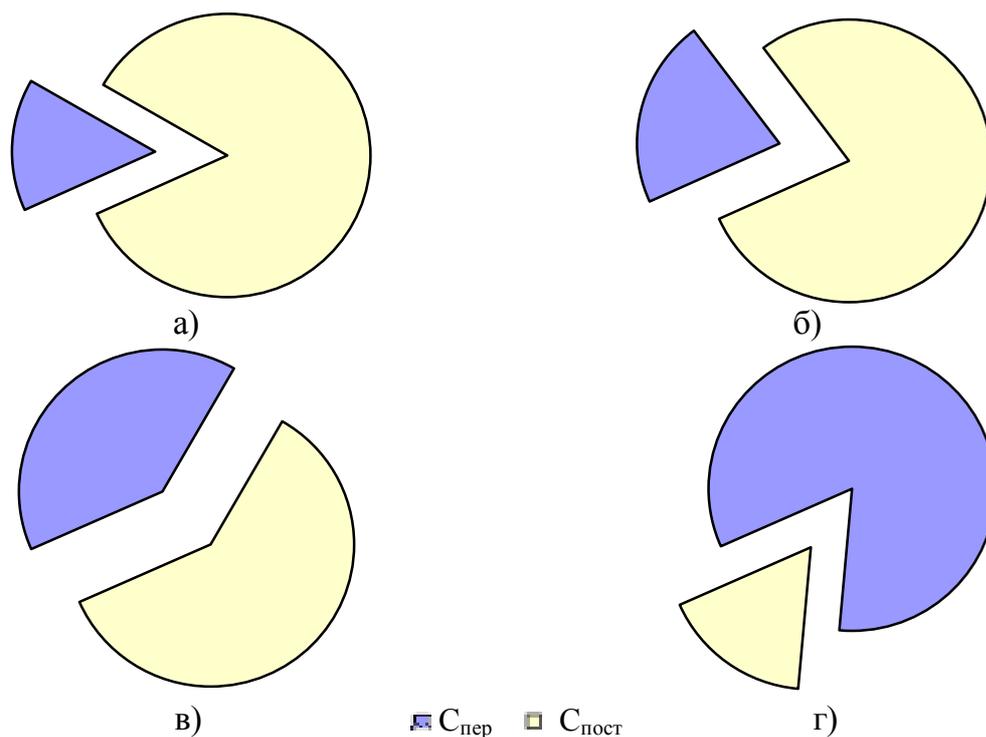


Рисунок 6.2.3. Составляющие технологической себестоимости обработки партии деталей: на одну деталь (а – по действующему техпроцессу; б – по результатам расчета) и партию деталей (в – по действующему техпроцессу; г – по результатам расчета)

Видно, что вариант обработки одной детали ШК, установленным на станке, имеет большую переменную часть себестоимости, чем при обработке кругом, рекомендованным техпроцессом на 16 %. Это вызвано увеличением основного времени. При этом же постоянные затраты при расчете себестоимости обработки одной детали превышают аналогичную составляющую при использовании результатов расчета на 21 %, что объясняется наличием в себестоимости доли стоимости круга, который необходимо приобрести для выполнения операции шлифования. В варианте обработки, полученном по результатам применения методики непрерывного проектирования такой составляющей нет и, соответственно, общая себестоимость производства одной детали меньше, в сравнении с заводскими данными на 15 %. При определении себестоимости производства всей партии деталей получаем, что постоянная составляющая технологической себестоимости для заводского варианта превышает результаты расчета практически в 6 раз. Это вызвано тем, что стоимость ШК, приобретаемого для обработки партии деталей, полностью входит в стоимость ее производства. В итоге, при использовании результа-

тов проектирования вместо имеющихся рекомендаций технологическая себестоимость снижается практически на 40 %.

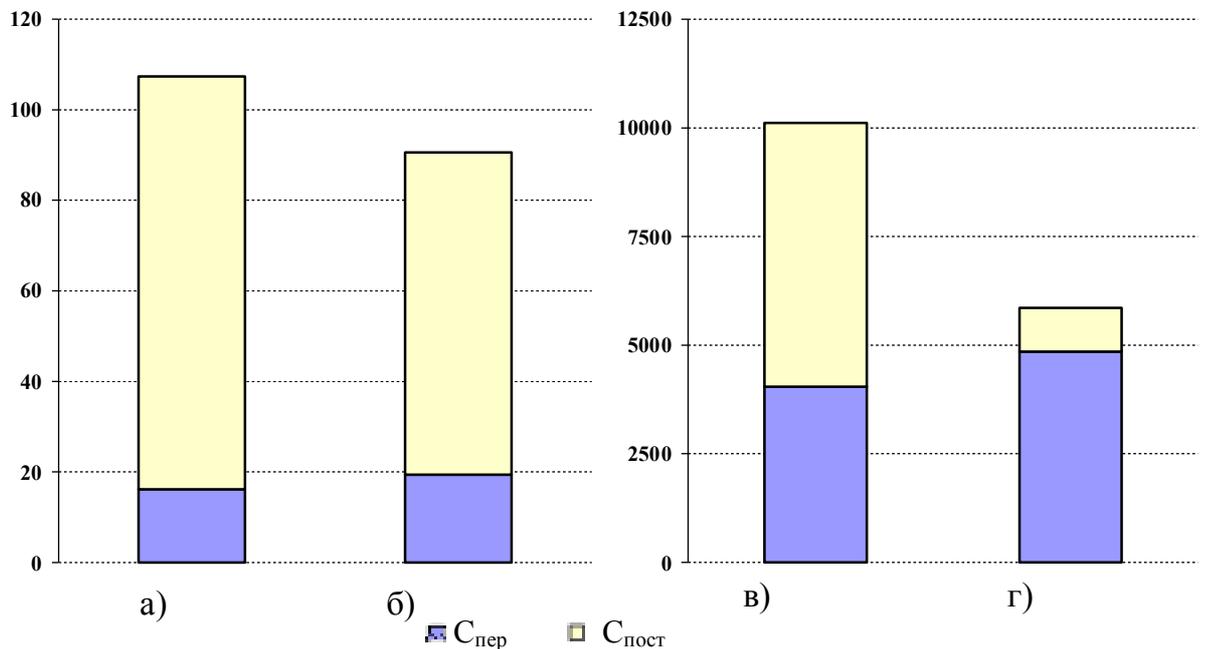


Рисунок 6.2.4. Технологическая себестоимость обработки: на одну деталь (а – по действующему техпроцессу; б – по результатам расчета) и партию деталей (в – по действующему техпроцессу; г – по результатам расчета)

Приведенные расчеты выполнены для действующих технологических процессов для конкретных условий (в т.ч. и характеристик инструмента). Установлено, что существует резерв повышения как эффективности операций абразивной обработки (см. рисунок 6.2.1), так и возможность снижения их трудоемкости за счет более эффективного использования ресурса работоспособности абразивного инструмента.

6.2.3. Формирование порядка замены инструмента на станке при известной перспективной ситуации

Вариативный характер разработанной методики континуального проектирования операций шлифования позволяет при известной перспективной производственной ситуации сформировать порядок замены ШК на станке для реализации рациональной обработки нескольких партий заготовок (см. рисунок 2.1.4).

Рассмотрим реализацию сценария II на примере производственных данных ООО «Челябинский тракторный завод – УРАЛТРАК».

Известна перспективная производственная ситуация: к обработке запланированы три группы заготовок, в каждой из которых 100 шт. При этом, требуется определить рациональные характеристики ШК, позволяющие обработать все партии заготовок с минимальными затратами времени, а также сформировать порядок замены инструментов на станке.

На предварительном этапе проектирования, в соответствии с существующими рекомендациями [258] назначаем характеристику инструмента для обработки каждой партии заготовок и режим шлифования (таблица 6.2.5).

Таблица 6.2.5. Исходные данные

№	Материал	ГрОМ	Характеристика ШК	Припуск, мм	Подача $V_{\text{Срэд}}$ мм/мин	$T_{\text{оп}}$ мин
1	Сталь 45	Ia	92AF46O7V	0,32	0,50	157,67
2	Сталь 40ХНМА	II	24AF54L7V	0,40	0,20	237,5
3	Сталь 14ХГН	IIIa	24AF60M7V	0,60	0,3	251,0

Видно, что для обработки каждой партии деталей необходимо использовать ШК конкретной характеристики. В этом случае суммарное время обработки всех партий составит 695 мин (с учетом трехкратной замены ШК на станке).

В соответствии с разработанной методикой (гл. 3, 4) прогнозируются эксплуатационные показатели ШК, указанных в таблице 6.2.5, при их использовании для обработки каждой партии заготовок. Затем, на работоспособность инструментов накладываются ограничения и в соответствии с разработанной методикой (п. 5.1) для каждого ШК определяется величина его периода стойкости для каждой величины скорости подачи. В дальнейшем определяется подача ШК, обеспечивающая выполнение целевой функции (2.2.1), при его использовании для обработки каждой партии заготовок. Промежуточные результаты проектирования приведены в таблице 6.2.6.

Таблица 6.2.6. Промежуточные результаты проектирования

Материал – сталь	Характеристика ШК	Обозначение ШК	Подача $V_{\text{спрд}}$, мм/мин	$T_{\text{оп}}$, мин
45	92AF46O7V	X ^I	0,50	89,5
40ХНМА			0,35	165,3
14ХГН			0,50	157,5
45	24AF54L7V	X ^{II}	0,40	105,5
40ХНМА			0,30	184,3
14ХГН			0,60	125,5
45	24AF60M7V	X ^{III}	0,30	144,2
40ХНМА			0,30	158,8
14ХГН			0,50	145,5

Таким образом, без учета времени на замену ШК определена номенклатура характеристик ШК и одновременно режим шлифования каждым ШК каждой партии заготовок, обрабатываемых в планируемом периоде времени. Перебор всех возможных вариантов порядка обработки и применения ШК различных характеристик, с различной величиной $\Sigma T_{\text{оп}}$, показан в таблице 6.2.7.

Таблица 6.2.7. Предварительные результаты проектирования (без учета времени на замену ШК)

Вар-т	$\Sigma T_{\text{оп}}, \text{мин}$										
I-3	412,29	II-3	415,33	III-3	448,50	I-3	405,83	III-3	416,29	I-3	421,83
I-2		II-2		III-2		I-2		III-2			
I-1		II-1		III-1		I-1		II-1			
Вар-т	$\Sigma T_{\text{оп}}, \text{мин}$										
III-3	419,33	I-3	486,00	II-3	454,00	I-3	466,95	III-3	393,83	II-3	373,83
II-2		II-2		I-2		III-2		I-2			
I-1		III-1		III-1		I-1		I-1			
Вар-т	$\Sigma T_{\text{оп}}, \text{мин}$										
II-3	399,33	I-3	428,29	III-3	409,83	II-3	434,95	I-3	431,33	III-3	474,00
II-2		I-2		III-2		I-2		II-2			
I-1		II-1		III-1		I-1		III-1			
Вар-т	$\Sigma T_{\text{оп}}, \text{мин}$										
II-3	396,29	II-3	389,83	III-3	454,95	II-3	380,29	III-3	400,29	II-3	428,50
I-2		III-2		I-2		I-2		III-2			
II-1		II-1		III-1		I-1		I-1			
Вар-т	$\Sigma T_{\text{оп}}, \text{мин}$										
I-3	460,50	I-3	447,33	III-3	435,33						
III-2		II-2		II-2							
III-1		II-1		II-1							

Из таблицы 6.2.7 видно, что рациональным порядком замены ШК на станке при обработке запланированных партий заготовок является I–III–II, т.е. 1 партию следует обрабатывать ШК характеристики X^I , вторую партию – кругом X^{III} , а третью – кругом X^{II} .

Как показано ранее, затраты времени на установку ШК характеристики, отличной от ШК уже установленного на станке могут быть оправданы высоким уровнем его работоспособности при обработке последующей партии заготовок, поскольку он более предпочтителен, чем ШК установленный на станке. Следовательно необходимо учитывать временные затраты на замену ШК на станке. Преобразуем таблицу 6.2.7 к виду, показанному на рисунке 2.1.4 (рисунок 6.2.5).

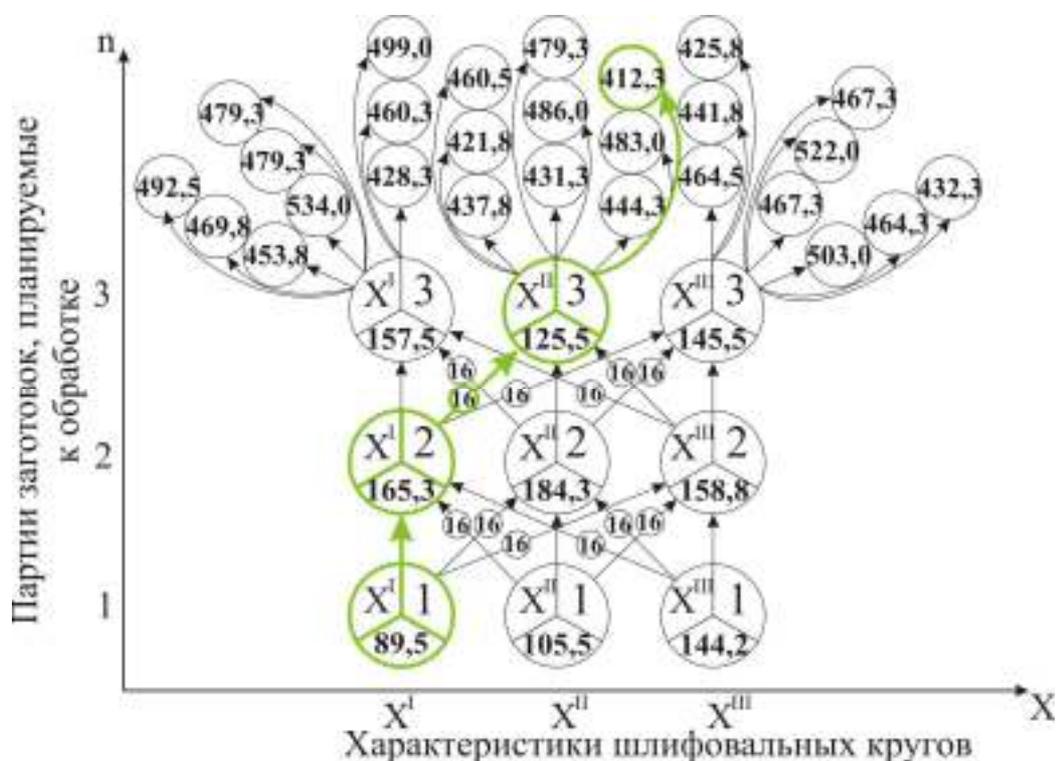


Рисунок 6.2.5 – Результаты реализации вариативного характера методики континуального проектирования операции шлифования

Внутри события «обработка партии заготовок ШК определенной характеристики» (большой круг) на рисунке 6.2.5 приведен номер обрабатываемой партии заготовок (1...3), обозначение характеристики круга (X^I , X^{II} или X^{III}) и величина оперативного времени (в нижней трети круга), в минутах. Внутри события «замена ШК» (малый круг) приведена величина времени (в минутах), затрачиваемого на замену, балансировку и правку ШК, устанавливаемого на станок.

Для рассматриваемого примера видно, что ранее полученный вариант замены ШК на станке «I–III–II» не является рациональным, т.к. он обеспечивает большее суммарное время обработки всех партий заготовок, чем вариант «I–I–II». Следовательно, для рассматриваемого примера рациональным порядком замены ШК на станке является вариант «I–I–II». При этом, уже определены режимы шлифования (подача ШК) для обработки каждой партии заготовок кругом выбранной характеристики. Снижение суммарного времени обработки всех партий заготовок, запланированных к обработке на станке, в сравнении с рекомендациями нормативных справочников составляет 1,7 раза.

Таким образом, показана практическая значимость и работоспособность разработанной методики континуального проектирования операций шлифования, основывающейся на прогнозировании работоспособности ШК для различных технологических условий (разные обрабатываемые материалы, требования по точности, шероховатости), позволяющей повысить эффективность операций шлифования.

6.3. Выводы

1. Выполненная практическая реализация методики континуального проектирования операций шлифования, реализуемых в производственных условиях, показала, что инструменты эксплуатируются на заниженных режимах шлифования. Повышение эффективности операций шлифования (снижение основного времени обработки) составляет 8...23 %.

2. Выполненное технико-экономическое обоснование эффективности операции шлифования, спроектированной с применением разработанной методики континуального проектирования, показало, что снижение себестоимости операции может составлять до 40 %.

3. Определенный рациональный порядок замены ШК на станке для известной перспективной ситуации сокращает суммарное время изготовления всех партий деталей в сравнении с применяемыми в настоящее время рекомендациями.

Глава 7. Внедрение результатов работы

7.1. Справочник «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах»

7.1.1. Выбор характеристики шлифовального круга

Назначение параметров характеристики ШК – первый этап проектирования операции шлифования, при выполнении которого необходимо учитывать имеющийся ресурс работоспособности инструмента. Для этого нужно обладать сведениями о работоспособности ШК в различных технологических условиях при обработке разных марок сталей и сплавов, достижении определенного уровня шероховатости, точности, износостойкости, режущей способности и т.д.

В редакции справочника 1978 г. [218] для конкретной схемы шлифования заготовки, изготовленной из определенной марки стали, со своими требованиями по твердости и шероховатости поверхности рекомендованы ШК конкретных характеристик. При этом пользователю дается минимальная возможность изменения марки абразивного материала, зернистости и структуры. Например, абразивный материал может быть 23А либо 24А, зернистость – 40 или 50, структура 6 или 7 (рисунок 7.1.1).



Рисунок 7.1.1. Структура методики назначения характеристики ШК в справочнике 1978 г. [218]

При этом дальнейшее проектирование операции (выбор режимов шлифования) идет в отрыве от ранее выбранной характеристики ШК, т.е. работоспособность круга выбранной характеристики не учитывается.

В новую редакцию справочника в основу рекомендаций по назначению характеристики ШК положены результаты имитационного моделирования механического взаимодействия различных абразивных материалов с разными обрабатываемыми материалами [258]. Величина долговечности абразивного материала, определенная по модели (3.2.4), послужила основой для составления рекомендаций по назначению марки абразивного материала для обработки материалов различных ГрОМ.

Имитационное моделирование для определения величины долговечности абразивного зерна проводилось для нескольких марок сталей и сплавов, принадлежащих одной группе обрабатываемости. Это позволило учесть разнообразие материалов, обрабатываемых шлифованием, а также их температурно-скоростные прочностные характеристики [105]. Затем находилось среднее значение величины долговечности для данного абразивного материала, осуществлялась относительная оценка долговечности в виде коэффициента применимости (таблица 7.1.1).

Впоследствии исследованные абразивные материалы выстраивались в ряд, начиная с наиболее предпочтительного, имеющего большую долговечность, заканчивая менее предпочтительным, с меньшей долговечностью, в зависимости от марки обрабатываемого материала. В итоге были получены данные, позволившие разработать рекомендации по применимости различных абразивных материалов для обработки разных марок сталей и сплавов (рисунок 7.1.2) [258].

В результате рекомендованные области эксплуатации ШК, изготовленных из различных абразивных материалов, существенно расширились. Это дает возможность более эффективного использования ресурса работоспособности абразивных инструментов и проектирования операций абразивной обработки для различных технологических условий.

Таблица 7.1.1 – Коэффициент применимости различных абразивных материалов

ГрОМ	Марка абразивного материала	Усредненная долговечность τ , с	Коэффициент применимости
I	92A	1,31	5
	25A	1,18	5
	14A	0,93	2
II	92A	1,24	4
	25A	1,09	3
	14A	0,88	2
III	92A	0,84	2
	25A	0,92	3
	14A	0,51	1
IV	92A	1,54	2
	25A	1,63	3
	14A	0,51	1
V	92A	1,95	2
	25A	2,14	4
	14A	0,74	1
VI	92A	1,98	2
	25A	2,21	4
	14A	0,96	1
VII	92A	2,16	2
	25A	2,29	3
	14A	1,03	1
VIII	92A	1,03	1
	25A	0,84	1
	14A	2,06	4

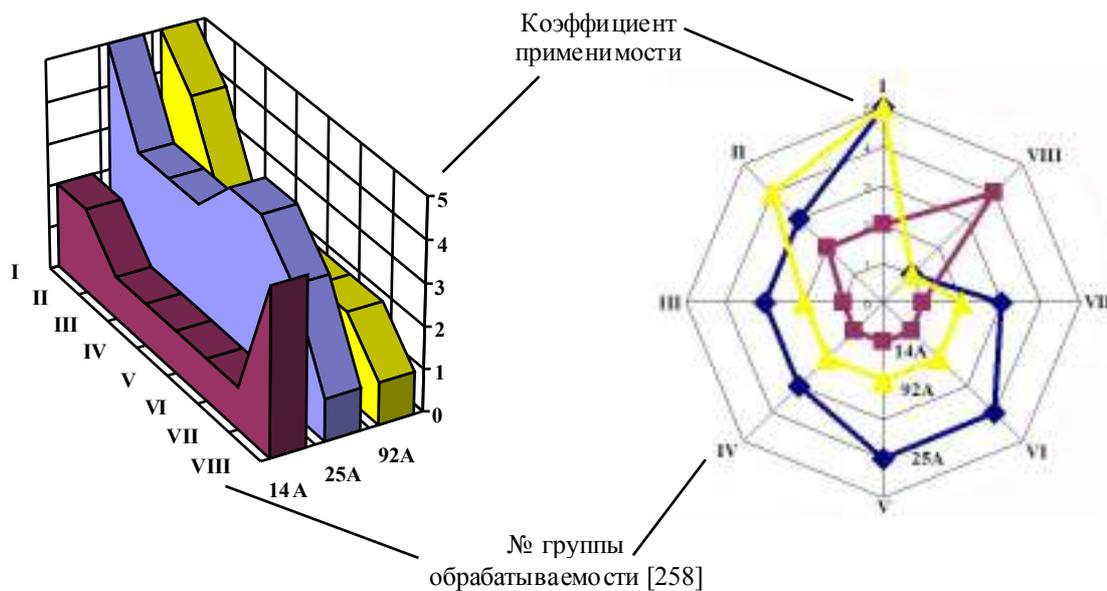


Рисунок 7.1.2. Относительная оценка различных абразивных материалов при обработке разных сталей и сплавов

7.1.2. Средние величины периодов стойкости шлифовальных кругов различных характеристик, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях

Реализация предложенной в п. 5.2. методики определения величины периода стойкости ШК нашла свое отражение в разделе справочника по режимам шлифования «Средние периоды стойкости шлифовальных кругов» [258]. Величины периодов стойкости были получены по результатам прогнозирования работоспособности ШК различных характеристик.

Отличительной особенностью данного раздела справочника является то, что величины периодов стойкости ШК впервые приведены в связи с параметрами характеристики инструмента (материал абразивного зерна, его зернистость), а также технологическими условиями реализации операции шлифования – видом шлифования, обрабатываемым материалом (группой обрабатываемости), а также стадией обработки. Наличие сведений по величинам периодов стойкости ШК различных характеристик позволит технологу, проектирующему операцию шлифования с применением справочных рекомендаций [258], ориентироваться при выборе ШК (рисунок 7.1.3).



Рисунок 7.1.3. Учитываемые факторы при определении величины периода стойкости [218, 258]

Титульные листы справочника (2007 и 2012 гг. издания), а также письма о внедрении приведены в Приложении Г.

7.2. Нормативно-техническая документация

С целью апробации результатов работы использован стандарт предприятия СТП 774-04-2004 «Круги шлифовальные. Эксплуатационные показатели», содержащий технологические эксплуатационные паспорта ШК различных характеристик, построенные по результатам стендовых испытаний инструментов [290].

Для апробации результатов работы в условиях машиностроительных предприятий использован руководящий технический материал «Круги шлифовальные. Методика работы с технологическим эксплуатационным паспортом» [263, 264], содержащий описание методов и подходов к решению задач технологического характера, возникающих на этапе проектирования операции шлифования, при помощи технологического эксплуатационного паспорта ШК.

Для предприятий машиностроения и абразивной отрасли разработан руководящий технический материал «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов» [265], содержащий методику расчетного определения величин эксплуатационных показателей ШК различных характеристик, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях, с применением созданной системы прогнозных моделей. Данный материал позволяет определять величины эксплуатационных показателей ШК различных характеристик с целью построения технологического эксплуатационного паспорта инструмента без выполнения стендовых испытаний для дальнейшего проектирования операции шлифования с учетом работоспособности инструмента.

Титульные листы разработанных документов, акты их апробации и внедрения приведены в Приложении Г.

Определение эксплуатационных свойств абразивных инструментов (по результатам стендовых испытаний или расчетным путем, как предложено в настоящей работе) и разработка на основе полученных результатов нормативно-технической документации – процесс достаточно трудоемкий. С одной стороны это, безусловно, позволит конечному потребителю эксплуатировать абразивные инструменты в более широком диапазоне технологических условий. Наличие сведений о работоспособности инструмента существенно облегчает задачу проектирования операций шлифования. Подробная информация о работоспособности абразивных инструментов, содержащаяся в комплекте технологических эксплуатационных паспортов [12, 14, 15, 21, 24, 34, 263–265, 290, 344], создает предпосылки для более эффективного использования ресурса работоспособности инструмента,

оценки его возможностей на этапе подбора характеристики и режимов обработки, сокращения времени технологической подготовки производства, а в итоге повышения эффективности производства [8, 17, 27–29, 333, 335, 338].

С другой стороны, для реализации методики континуального проектирования операций шлифования в полном объеме существует необходимость развития имеющихся моделей процесса шлифования, их уточнения и формирования базы знаний не только по константным величинам, таким как действительное сопротивление сталей и сплавов шлифованию σ_i , но и по коэффициенту сродства $D_{ср}$, долговечности абразивных материалов $\tau_{ц}$ – величинам, которые значительно изменяются в зависимости от технологических условий эксплуатации абразивного инструмента [9, 13, 16, 18–20, 25, 26, 30–33, 46, 334–337, 339–342]. Это требует проведения достаточно обширных научных исследований, в том числе большого объема экспериментальных работ.

Так, необходимы исследования влияния на величину площадки затупления различных составов СОТС и способов их подачи в зону шлифования, параметров поверхностного слоя заготовки перед шлифованием, режимов правки ШК, наличия в инструменте импрегнаторов и т.д., результаты которых будут выражены в технологических документах, позволяющих проектировать эффективные операции шлифования с учетом указанных факторов. На данном этапе учет указанных параметров можно вести на основе системы поправочных коэффициентов, которая базируется на накопленном к настоящему моменту времени материале по влиянию различных технологических условий на показатели шлифования.

По-сути, в многономенклатурном производстве для ШК необходима подробная инструкция по его эксплуатации, представляющая собой технологические рекомендации по эксплуатации ШК данной характеристики в различных технологических условиях. Учитывая большое число сочетаний параметров характеристики абразивного инструмента, а также количество марок сталей и сплавов, обрабатываемых в современном машиностроении шлифованием, реализация такой инструкции в виде системы справочников видится крайне затруднительной.

В конечном счете, реализация методики континуального проектирования операций шлифования возможна в виде модулей технологической подготовки, интегрируемых в существующие САПР технологической направленности, осуществляющих инженерный анализ процессов механической обработки заготовок методами имитационного моделирования с целью проектирования наиболее эффективной технологии [10, 99, 343]. Интеграция расчетного имитационного модуля в CAD-CAM систему проектирования позволит осуществлять имитационное моделирование процесса шлифования без изготовления опытной партии, минуя этап отработки технологического процесса непосредственно на станке.

7.3. Результаты

1. Результаты исследования долговечности абразивных материалов при обработке различных марок сталей и сплавов реализованы в виде рекомендаций по назначению марки абразивного материала ШК в разделе справочника по режимам шлифования.

2. Результаты реализации методики определения периода стойкости ШК представлены в виде приложения справочника по режимам шлифования, содержащего средние величины периодов стойкости ШК различных характеристик, эксплуатирующихся в разных технологических условиях.

3. Разработан руководящий технический материал, содержащий методику прогнозирования работоспособности ШК для широкого диапазона технологических условий эксплуатации, а также методику проектирования эффективных операций шлифования.

4. Разработанный справочник по режимам шлифования, а также нормативно-техническая документация прошли промышленную апробацию и используются на предприятиях машиностроения, а также в абразивной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача, имеющая важное государственное хозяйственное значение, связанная с повышением эффективности операций шлифования в условиях современного многономенклатурного производства на основе применения разработанной новой методики континуального проектирования операций шлифования, базирующейся на прогнозировании работоспособности шлифовальных кругов в широком диапазоне технологических условий их эксплуатации.

Разработано научное обеспечение концептуально нового подхода к проектированию операций шлифования, выполняемых в условиях многономенклатурного производства, включающее математические модели износа абразивного зерна и площадки затупления на абразивном зерне, комплекс стохастических имитационных моделей, позволяющих прогнозировать работоспособность ШК в широком диапазоне технологических условий проектируемой операции, комплекс методик континуального проектирования операций шлифования, прогнозирования эксплуатационных показателей и определения периода стойкости ШК, результаты дифференцированной оценки интенсивности механического и физико-химического износов абразивных зерен и адекватные доказательства разработанных моделей.

Разработано технологическое обеспечение проектирования операций шлифования для условий многономенклатурного производства, включающее комплекс инженерных методик и рекомендаций по проектированию и реализации операций шлифования, регламентирующих выбор параметров проектируемой операции шлифования с учетом конкретных технологических условий ее выполнения при обеспечении всех требований чертежа детали и минимизации затрат времени на ее выполнение, результаты экспериментальных исследований работоспособности ШК на операциях шлифования заготовок из материалов различных групп обрабатываемости.

Разработанное в диссертационной работе научное и технологическое обеспечение концептуально нового подхода к проектированию операций шлифования, выполняемых в условиях многономенклатурного производства, позволило повы-

ситель эффективность операций шлифования за счет сокращения номенклатуры ШК для конкретных условий их эксплуатации, снижения основного технологического времени обработки за счет рационального использования ресурса работоспособности инструмента и затрат на приобретение ШК.

Проведенный комплекс исследований по проблеме повышения эффективности операций шлифования позволяет сделать следующие выводы.

1. Обоснована необходимость проектирования операций шлифования на основе учета сведений о ШК, которые отражают текущий уровень его работоспособности в широком диапазоне технологических условий (различные обрабатываемые материалы, характеристики ШК, диапазон точности, шероховатости и др.). Работоспособность любого ШК континуальна, изменяется в зависимости от условий эксплуатации инструмента, времени его работы и характеризуется режимно-временной областью, что впервые позволяет определить рациональные режимы шлифования в зависимости от требований, предъявляемых к операции. Анализ производственных данных по эксплуатации ШК различных характеристик показал, что на предприятиях выполняются операции шлифования ШК характеристик, отличающихся от рекомендованных нормативами режимов шлифования. Т.е. существуют операции, на которых используется ресурс работоспособности инструмента в различных технологических условиях, при незначительном снижении производительности процесса. Вместе с тем существует значительный резерв повышения эффективности таких операций за счет учета работоспособности ШК в широком диапазоне технологических условий.

2. На основе учета свойства континуальности работоспособности ШК создана методика континуального проектирования операций шлифования, которая впервые позволяет проектировать операции шлифования с учетом работоспособности инструмента при его эксплуатации в широком диапазоне технологических условий. Принципиальное отличие разработанной методики в том, что ШК рассматривается как инструмент, возможный к применению в широком диапазоне технологических условий – для обработки заготовок из различных материалов с выполнением разных требований к качеству обработки. Это является существенной предпосылкой для повышения эффективности операций шлифования, реали-

зуемых в современных условиях многономенклатурного производства. Разработана структура и наполнение методики. Предложена целевая функция, сформирован набор технологических ограничений для проектирования эффективных операций шлифования.

3. Разработана математическая модель долговечности абразивного зерна, реализованная на основе кинетической теории прочности твердых тел, позволившая установить взаимосвязь между технологическими условиями эксплуатации ШК и механическим износом единичного абразивного зерна. Это позволяет оценивать работоспособность того или иного абразивного инструмента в широком диапазоне технологических условий его эксплуатации.

Установлено, что увеличение температуры в зоне шлифования с 400 до 800 °С повышает долговечность абразивного зерна более чем на 60 %, изменение зернистости с F90 до F46 – более чем на 50 %. Увеличение площадки затупления оказывает характеристическое влияние на долговечность абразивного зерна: для каждой зернистости существует определенная площадка затупления, при которой долговечность абразивного зерна максимальна.

4. Оценка интенсивности физико-химического износа, характеризуемого коэффициентом химического средства, позволила охватить номенклатуру материалов различного химсостава и впервые позволила установить степень влияния компонентов обрабатываемого материала на интенсивность протекания данного вида износа: увеличение содержания углерода в обрабатываемом материале в 2 раза снижает коэффициент средства более чем в 1,2 раза; увеличение содержания хрома до 1 % снижает коэффициент средства в 2,4...6,4 раза; дальнейший рост концентрации хрома приводит к увеличению коэффициента средства в 1,23...2,0 раза; концентрация никеля оказывает обратное влияние: ее увеличение до 1 % приводит к увеличению коэффициента средства в 1,3...2,6 раза, дальнейший рост концентрации никеля уменьшает коэффициент средства практически в 2,5...5,0 раз; рост концентрации титана в сплавах типа ВГ на 5 % увеличивает коэффициент средства на 1...2 %, а дальнейшее увеличение концентрации титана приводит к возрастанию коэффициента средства практически в 1,3 раза; марганцовистые стали имеют тенденцию к снижению коэффициента средства в 1,4 раза с увели-

чением концентрации углерода в 3 раза. Полученные результаты позволяют расчетным путем определять коэффициент сродства для прогнозирования величины физико-химического износа абразивного зерна при шлифовании.

5. Разработана математическая модель износа абразивного зерна в процессах шлифования, впервые учитывающая механический износ абразивного зерна, реализованный при помощи основных положений кинетической теории прочности твердых тел и физико-химический износ абразивного зерна, реализованный на основе учета коэффициента сродства – количественного параметра интенсивности физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала при шлифовании. Модель позволяет определять величину износа в зависимости от времени работы инструмента и условий его эксплуатации (режимы шлифования, механические и физико-химические свойства обрабатываемого и абразивного материала).

6. Дифференцированный учет механизмов износа абразивного зерна при шлифовании позволил оценить соотношение механического и физико-химического износа при обработке различных материалов. Выявлено соотношение механического и физико-химического износа абразивного зерна, необходимое для количественной оценки каждого из механизмов износа при эксплуатации ШК в широком диапазоне технологических условий. Это соотношение составило: для стали, легированной хромом и кремнием – 60/40; для стали, легированной марганцем – 70/30; для титанового сплава – 60/40.

7. Разработана математическая модель расчета размера площадки затупления абразивного зерна, которая впервые позволяет спрогнозировать ее величину для широкого диапазона технологических условий операции, с учетом основных факторов эксплуатации инструмента – времени работы, параметров характеристики инструмента, температуры и марки обрабатываемого материала. Модель реализована в виде алгоритма и является рекурсивной, т.е. учитывает нелинейную обратную связь по величине площадки затупления, сформированной в предшествующий момент времени контакта зерна с обрабатываемым материалом. Установлено, что за время работы инструмента происходит изменение величины площадки: при работе ШК зернистостью F60 – на 15 %, F46 – от 20 до 40 %, что

существенно. Модель позволяет определить размер площадки затупления единичного абразивного зерна ШК для различных технологических условий, что дает возможность прогнозирования работоспособности инструмента.

8. Разработана методика прогнозирования работоспособности ШК, впервые позволяющая на основе комплекса имитационных стохастических моделей, связывающих величину соответствующего показателя с режимами шлифования и временем работы инструмента, определить работоспособность инструмента в широком диапазоне технологических условий проектируемой операции шлифования. В основу методики положен учет изменения размера площадки затупления абразивного зерна во времени работы инструмента, что впервые позволяет расчетным способом определять область его работоспособности, что, в свою очередь, обеспечивает повышение эффективности операций шлифования для широкого диапазона технологических условий их реализации.

9. Разработана методика определения периода стойкости ШК, эксплуатирующегося в различных технологических условиях, учитывающая характеристику абразивного инструмента и параметры операции шлифования. Суть методики – в определении режимно-временной области эксплуатации инструмента, полученной по результатам прогнозирования его работоспособности, с одновременным выполнением всех технологических ограничений операции шлифования.

10. Разработан комплекс инженерных методик проектирования операций шлифования для условий многономенклатурного производства, в котором учитывается работоспособность инструмента. Методики базируются на сравнительном анализе эксплуатационных свойств различных ШК, выделении режимно-временной зоны их рациональной эксплуатации и одновременном определении пары «характеристика ШК – режим шлифования» для выполнения операции шлифования в конкретных технологических условиях с обеспечением всех требований чертежа детали, при минимуме технической нормы времени. Комплекс включает методики проектирования операций шлифования для:

- обработки всех заготовок, поступающих на станок, ШК, установленным на станке: при этом определяется режим шлифования для каждой партии заготовок, планируемых к обработке, что повышает эффективность операций шлифова-

ния за счет максимального использования ресурса работоспособности инструмента и сокращения технической нормы времени (времени на замену ШК);

- определения пары «характеристика ШК–режим шлифования» для обработки партий заготовок, поступаемых на станок в плановом периоде времени, что повышает эффективность операций шлифования за счет сокращения номенклатуры приобретаемого инструмента;

- определения порядка замены ШК на станке для обработки партий заготовок, планируемых к поступлению на станок в течение периода времени: при этом одновременно для обработки каждой партии заготовок определяется характеристика ШК и режим шлифования, что повышает эффективность операций шлифования, за счет сокращения времени, затрачиваемого на переналадку станка.

11. Разработано алгоритмическое и информационное обеспечение модуля технологической подготовки производства «Т&ТооL». Модуль впервые позволяет прогнозировать величины эксплуатационных показателей ШК различных характеристик, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях и выполнять проектирование операций шлифования (выбор характеристики ШК и режима шлифования) для партий различных заготовок.

12. По результатам исследований долговечности различных абразивных материалов при обработке разных марок сталей сформированы рекомендации по выбору марки абразивного материала ШК, а также получены данные по средним величинам периода стойкости различных ШК. Материалы оформлены в виде соответствующих разделов справочника по режимам шлифования, который прошел промышленную апробацию и используется в технологических службах 99 машиностроительных предприятий страны, в 16 учебных заведениях высшего и 8 заведениях среднего образования. Разработанный руководящий технический материал «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов», содержащий методику прогнозирования работоспособности инструмента и инженерные методики проектирования операций шлифования в многономенклатурном производстве, внедрен на предприятиях машиностроения и абразивной отрасли в качестве нормативно-технологических рекомендаций.

13. Практическое использование методики континуального проектирования операций шлифования, методики прогнозирования работоспособности ШК, а также инженерной методики проектирования операций шлифования позволили:

- определить режим шлифования для ШК определенной характеристики, повысив тем самым эффективность использования ресурса его работоспособности при эксплуатации в изменяющихся технологических условиях (разные марки обрабатываемого материала, требования к качеству обработки и т.д.), что позволило сократить основное технологическое время обработки до 20 %;

- определить пару «характеристика ШК–режим шлифования» для изготовления партий различных деталей, сократив тем самым номенклатуру абразивного инструмента, применяемого для реализации операций шлифования, что позволило повысить эффективность шлифования более чем на 15 % на одну деталь и 42 % на партию деталей за счет снижения себестоимости изготовления;

- сформировать рациональный порядок замены ШК различных характеристик на станке для обработки различных партий заготовок в планируемом периоде времени, сократив тем самым суммарное время обработки этих партий, что привело к повышению эффективности операций шлифования на 40 % за счет сокращения суммарного времени обработки всех партий заготовок.

14. Внедрение результатов работы в производственных условиях ООО «Челябинский тракторный завод – УралТРАК» (г. Челябинск), ПАО «Уральский завод тяжелого машиностроения» (г. Екатеринбург), ООО «Уральский механический завод» (г. Первоуральск), ПАО «Агрегат» (г. Сим), АО «Кыштымское машиностроительное объединение» (г. Кыштым), ООО «Уральский завод спецтехники» (г. Миасс) и др. позволило повысить эффективность операций шлифования за счет рационального использования ресурса работоспособности инструмента, что привело к сокращению основного технологического времени обработки различных деталей на 15...20 %, номенклатуры применяемого инструмента на 15...20 % и снижению затрат на приобретаемый абразивный инструмент на 25...30 %.

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов работы составил 1 264 812 руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 455271 СССР, МПК⁵ G 01 N 3/56, G 01 N 19/00, F 24 K 38/01, В 24 В 49/00. Способ испытания шлифовальных кругов [Текст] / А.А. Ковалев, В.В. Филиппов. – 1792394; заявл. 31.05.1972; опубл. 30.12.1974, Бюл. № 48. – 2 с.: ил.
2. А.с. 633720 СССР, МПК⁵ В 24 В 49/00. Устройство для контроля размеров шлифовального круга [Текст] / Г.В. Семенов, В.Ф. Курдя, Е.М. Харитонов. – № 2497471; заявл. 16.06.1977; опубл. 25.11.78, Бюл. № 43. – 2 с.: ил.
3. А.с. 111598 СССР, МПК⁶ G 01 L 1/04, И 24 И 49/00. Приспособление к круглошлифовальным станкам для непрерывного измерения радиального усилия шлифования [Текст] / Б.С. Балакшин, Л.В. Худобин, Д.В. Чарнко. – № 561324; заявл. 24.11.1956; опубл. 01.01.1957, Бюл. № 2. – 3 с.: ил.
4. Абросимов, В.Н. Испытательный стенд для торцешлифовальных кругов / В.Н. Абросимов, Л.Г. Огаркова // Труды ВНИИАШ. – 1984. – № 9. – С.68–72.
5. Алексеев, Н.С. Износ шлифовальных кругов при обработке микропористых покрытий / Н.С. Алексеев // Известия вузов. Машиностроение. – 2004. – № 2. – С. 57–61.
6. Алексеева, Н.В. Огнеупорные материалы на основе фаз системы MgO-Al₂O₃-TiO₂: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Алексеева Наталья Владимировна. – Санкт-Петербург, 2005 – 200 с.
7. Ананьян, В.А. Организация централизованной подготовки к работе и эксплуатации абразивного, алмазного и эльборового инструмента / Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборной обработки в машиностроении: тезисы докладов. – Москва, 1979. – С. 36–38.
8. Ардашев, Д.В. Алгоритмическая модель методики континуального проектирования операций шлифования / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // СТИН. – 2016. – № 5. – С. 31–34.
9. Ардашев, Д.В. Алгоритмическая рекурсивная модель площадки затупления абразивного зерна / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2016. – № 2. – С. 17–19.
10. Ардашев, Д.В. Геометрическая имитационная модель процесса шлифования с учетом износа абразивного зерна / Д.В. Ардашев, Л.В. Шипулин // СТИН. – 2016. – № 8. – С. 18–22.
11. Ардашев, Д.В. Двухпараметрическая оценка эксплуатационных показателей шлифовального круга / Д.В. Ардашев // Вестник машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 63–65.
12. Ардашев, Д.В. Информационно-методическая база режимно-инструментального оснащения операций абразивной обработки для современных условий мирового машиностроения / Д.В. Ардашев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6. – С. 813–817.
13. Ардашев, Д.В. Кинетическая трактовка стойкости абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 10–19.
14. Ардашев, Д.В. Комплекс показателей оценки эксплуатационных свойств шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Технология машиностроения. – 2010. – № 9. – С. 30–33.

15. Ардашев, Д.В. Комплексное описание эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 33. – С. 113–116.
16. Ардашев, Д.В. Контактные явления износа в паре «абразив–сталь» / Д.В. Ардашев // Технология машиностроения. – 2014. – № 9. – С. 19–21.
17. Ардашев, Д.В. Континуальное проектирование операций шлифования / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // СТИН. – 2016. – № 8. – С. 33–37.
18. Ардашев, Д.В. Напряженно-деформированное состояние абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев, И.С. Болдырев // Технология машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 27–30.
19. Ардашев, Д.В. Определение величины износа абразивного зерна при шлифовании с позиций кинетической теории прочности / Д.В. Ардашев // Трение и износ. – 2015. – № 3. – С. 344–351.
20. Ардашев, Д.В. Определение износостойкости абразивного зерна при шлифовании на основе кинетической теории прочности / Д.В. Ардашев // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. трудов I Межд. заочн. научно-техн. конф. – 2013. – С. 260–267.
21. Ардашев, Д.В. Определение периода стойкости шлифовального круга на основе его технологического эксплуатационного паспорта / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2010. – № 1. – С. 23–27.
22. Ардашев, Д.В. Основные задачи, решаемые на базе технологического эксплуатационного паспорта шлифовального круга / Д.В. Ардашев // Проведение научных исследований в области машиностроения: сб. материалов научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. – Тольятти, ТГУ, 2009. – С. 92–98.
23. Ардашев, Д.В. Оценка работоспособности шлифовального круга по комплексу эксплуатационных показателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Ардашев Дмитрий Валерьевич. – Челябинск. – 2005. – 261 с.
24. Ардашев, Д.В. Паспортизация шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2011. – № 6. – С. 27–29.
25. Ардашев, Д.В. Прогнозирование величины износа абразивного зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2014. – № 11. – С. 33–37.
26. Ардашев, Д.В. Прогнозирование долговечности абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2014. – № 10. – С. 27–31.
27. Ардашев, Д.В. Прогнозирование работоспособности абразивного инструмента при проектировании многономенклатурных операций / Д.В. Ардашев // СТИН. – 2014. – № 9. – С. 14–17.
28. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение операций абразивной обработки на основе вариативного проектирования / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // СТИН. – 2016. – № 11. – С. 32–35.
29. Ардашев, Д.В. Особенности проектирования операций шлифования в современном машиностроении / Д.В. Ардашев, В.И. Гузеев // В сборнике: материалы 8-й Международной научно-технической конференции «Наукоемкие тех-

нологии на современном этапе развития машиностроения» (ТМ–2016). – Москва. – 2016. – С. 21–23.

30. Ардашев, Д.В. Термомеханическая усталость абразивного зерна / Д.В. Ардашев // *Металлообработка*. – 2012. – № 4. – С. 2–4.

31. Ардашев, Д.В. Термофлуктуационный механизм износа абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // *Наукоемкие технологии*. – 2013. – № 12. – С. 23–28.

32. Ардашев, Д.В. Физико-химический износ в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // *Трение и износ*. – 2014. – № 4. – С. 437–443.

33. Ардашев, Д.В. Химическое сродство абразивного и обрабатываемого материалов / Д.В. Ардашев // *Металлообработка*. – 2011. – № 6. – С. 29–32.

34. Ардашев, Д.В. Эксплуатационные характеристики шлифовального круга в виде технологического паспорта / Д.В. Ардашев // *Технология машиностроения*. – 2010. – № 4. – С. 26–28.

35. Багайсков, Ю.С. Улучшение структурно-механических и эксплуатационных свойств абразивных инструментов с порообразователем / Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер // *Технология машиностроения*. – 2007. – № 9. – С. 34–37.

36. Банных, О.А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова и др. – М.: *Металлургия*, 1986. – 440 с.

37. Белянкин, Д. С. Физико-химические системы силикатной технологии / Д.С. Белянкин, В.В. Лапин, Н.А. Торопов. – М.: *Промстройиздат*. – 1954. – 372 с.

38. Бердичевский, Е.Г. Прогнозирование надежности шлифовальных кругов / Е.Г. Бердичевский, А.П. Глушенков // В сб. «Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении». – Ленинград, 1981. – С. 117–118.

39. Бобров, В.Ф. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – М.: *Машиностроение*, 1967. – 416 с.

40. Богомолов, Н.И. Износ корунда и карбида кремния при шлифовании титановых сплавов / Н.И. Богомолов, Г.И. Саютин, И.В. Харченко, В.Ф. Бердилов, В.М. Сновидов // *Абразивы*. – 1973. – № 6. – С. 15–19.

41. Богомолов, Н.И. Динамика процесса шлифования жаропрочных сплавов в связи с затуплением шлифовальных кругов / Н.И. Богомолов, Г.И. Саютин // *Абразивы и алмазы*. – 1967. – № 1. – С. 29–33.

42. Богомолов, Н.И. Исследование явлений при взаимодействии эльбора с титановым сплавом в условиях микрорезания / Н.И. Богомолов, Г.И. Саютин, А.П. Татаринов // *Абразивы*. – 1974. – № 7. – С. 15–18.

43. Богомолов, Н.И. Установка для исследования в лабораторных условиях процессов обработки абразивными брусками / Н.И. Богомолов, Е.И. Горбатов, О.Л. Козлов, В.И. Ян // *Абразивы*. – 1972. – № 8. – С. 21–23.

44. Бокштейн, Б.С. Диффузия атомов и ионов в твердых телах / Б.С. Бокштейн, А.Б. Ярославцев. – М.: *МИСИС*, 2005. – 362 с.

45. Бокштейн, Б.С. Почему и как движутся атомы в твердых телах / Б.С. Бокштейн // *Соросовский образовательный журнал*. – 1995. – № 1 – С. 108–115.

46. Болдырев, И.С. Определение прочностных характеристик абразивного зерна в процессах шлифования / И.С. Болдырев, Д.В. Ардашев // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. трудов I Межд. заочн. научно-техн. конф. – 2013. – С. 516–523.
47. Большая Советская энциклопедия.– М.: Большая Сов. энцикл., 1955. – Т.35.
48. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 152 с.
49. Боровский, Г.В. Влияние размеров круга и шлифуемой поверхности на показатели процесса заточки кругами из эльбора / Г.В. Боровский // Абразивы. 1976. – № 11. – С. 6–11.
50. Брагина, Л.Л. Защитные технологические покрытия в металлургии и машиностроении / Л.Л. Брагина, А.Д. Чепурной // Сб. научн. трудов «Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск «Машиноведение и САПР». – 2005. – № 53. – С. 24–28.
51. Братчиков, А.Я. Шлифование постоянных магнитов пропитанным абразивным инструментом / А.Я. Братчиков // Абразивы. – 1980. – № 3. – С. 6–8.
52. Буторин, Г.И. Комплекс показателей абразивных инструментов / Г.И. Буторин, В.М. Исаков, Е.И. Ардашев // Абразивный инструмент с полимерными и керамическими связующими: сб. научных статей. – Свердловск, 1982. – С. 25–30.
53. Буторин, Г.И. Оценка эффективности применения шлифовальных кругов по показателям их работоспособности / Г.И. Буторин, В.М. Исаков // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. науч. трудов. – Челябинск, 1982. – С. 26–29.
54. Буторин, Г.И. Принципы оценки работоспособности шлифовальных кругов / Г.И. Буторин // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. научн. трудов. – Челябинск, 1986. – С.91–93.
55. Буханько, Н.Г. Взаимодействие алюминия с кобальтом и титаном / Н.Г. Буханько, Е.Ф. Казакова, Е.М. Соколовская // Вестник Московского университета: серия 2. Химия. – 2002. – 43. – С. 51–57.
56. Быков, Е.В. Исследование стойкости кругов при внутреннем шлифовании колец подшипников / Е.В. Быков, З.И. Кремень // Абразивы. – 1974. – № 6. – С. 22–24.
57. Вакуленко, А.А. Кинетика хрупкого разрушения упругих тел / А.А. Вакуленко, С.А. Кукушкин // Физика твердого тела. – 1998. – том 40. – № 7. – С. 1259–1263.
58. Вартанов, В.О. Оптимизация характеристик эластичного абразивного инструмента / В.О. Вартанов, В.А. Щеголев, Н.П. Меткин // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении: тезисы докладов. – Ленинград, 1981. – С. 70–71.
59. Васильев, Н.Н. Определение качества шлифовальных кругов / Н.Н. Васильев // Высокопроизводительное шлифование. – М.: Изд. Академии наук СССР, 1962. – С. 75–83.

60. Васильева, З.А. Малые и средние предприятия в машиностроении [Электронный ресурс] / З.А. Васильева, А.В. Назаревич // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – Режим доступа: cyberleninka.ru/article/n/malye-i-srednie-predpriyatiya-v-mashinostroenii
61. Васин, В.И. Эффективность использования абразивных кругов, пропитанных серой / В.И. Васин // Абразивы. – 1977. – № 34. – С. 6–7.
62. Веткасов Н.И. Исследование и разработка технологических основ унификации технологических жидкостей для операций шлифования стальных заготовок деталей машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Веткасов Николай Иванович. – Ульяновск, 1983. – 305 с.
63. Веткасов, Н.И. Расчет шероховатости поверхностей, шлифованных с применением твердых смазочных материалов / Н.И. Веткасов, А.В. Степанов // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 3-1. – С. 36–40.
64. Власов, С.А. Исследование шлифующей способности многониточных кругов из эльбора на операции резьбошлифования быстрорежущих сталей / С.А. Власов, Ю.Г. Прохоров, В.Ф. Конюхов // Абразивы. – 1978. – № 11. – С.1–2.
65. Волков, М.П. Эффективность применения новых СОЖ при шлифовании деталей подшипников качения / М.П. Волков // Абразивы. – 1977. – № 6. – С. 5–7.
66. Волский. Н.И. Обрабатываемость металлов шлифованием / Н.И. Волский. – М.: Машгиз, 1950. – 72 с.
67. Волынский, А.Л. Зависит ли прочность твердого тела от его размеров / А.Л. Волынский // Природа. – 2007. – № 9. – С. 10–19.
68. Габданк, В.К. Выбор оптимальных режимов шлифования пермаллоевых сплавов / В.К. Габданк, С.Е. Гиршовичус, З.И. Кремень, В.И. Островский // Абразивы. – 1972. – № 9. – С. 16–18.
69. Гаврилов, П.А. Метод испытания шлифовальной шкурки на шлифующую способность по съему металла / П.А. Гаврилов. – Абразивы. – 1972. – № 6. – С. 19–20.
70. Гаршин, А.П. Абразивные материалы / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Ю.В. Лагунов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 231 с.
71. Гисметулин, А.Р. Моделирование формообразования шероховатости поверхности на операции плоского шлифования / А.Р. Гисметулин, О.М. Сидоренко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – № 4. – С. 850–855.
72. Глаговский, Б.А. Автоматизация испытаний абразивных инструментов / Б.А. Глаговский, Г.Ш. Ройштейн // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента. – Челябинск, 1978. – С. 4–8.
73. Глаговский, Б.А. Контрольно-измерительные приборы и основы автоматизации производства абразивных инструментов: учебное пособие для машиностроительных техникумов / Б.А. Глаговский, Г.Ш. Ройштейн, В.А. Яшин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 287 с.
74. Глаговский, Б.А. О решении задачи информационного поиска при создании АСУ «Шлифование» / Б.А. Глаговский, В.З. Гузель, З.И. Кремень, Л.И. Линдунен, П.С. Носов, Г.Ш. Ройштейн // Труды ВНИИАШ. – 1976. – № 20. – С. 4–12.

75. Глаговский, Б.А. Определение и контроль динамических характеристик / Б.А. Глаговский, Л.И. Линдунен, П.С. Носов, Г.Ш. Ройштейн. – М.: НИИмаш, 1980. – 72 с.
76. Глаговский, Б.А. Определение и контроль динамических характеристик шлифовальных кругов / Б.А. Глаговский. – Л.: НИИМАШ, 1976. – 76 с.
77. Глаговский, Б.А. Оптимизация количества информации при автоматизированных испытаниях абразивных кругов / Б.А. Глаговский, Л.И. Линдунен, Г.Ш. Ройштейн // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента: тезисы докладов. – Челябинск, 1978. – С. 31–32.
78. Глаговский, Б.А. Последовательный регрессионный анализ при оценке качества шлифовальных кругов на автоматизированном испытательном комплексе ВНИИАШ / Б.А. Глаговский, Н.Ф. Торопов, Е.Г. Щелачева // Абразивы. – 1983. – № 7. – С. 13–19.
79. Глаговский, Б.А. Построение автоматизированного комплекса для испытания эксплуатационных свойств шлифовальных кругов / Б.А. Глаговский, Э.Я. Довгаль, Э.С. Евсиович, Л.И. Линдунен, П.С. Носов, Л.А. Резник, Г.Ш. Ройштейн // Труды ВНИИАШ. – 1976. – № 19. – С. 13–24.
80. Глебовский, П.А. Кинетическая трактовка структурно-временного критерия разрушения / П.А. Глебовский, Ю.В. Петров // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46. – № 6. – С. 1021–1024.
81. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
82. Голишников, Н.И. Эксплуатационные свойства шлифовальных кругов из электрокорунда марки 93А на керамической связке / Н.И. Голишников, Е.В. Караулов // Абразивы. – 1981. – № 9. – С. 4–9.
83. Голованова, М.Н. Исследование эксплуатационных показателей жидких полировальных паст при обработке нержавеющей сталей / М.Н. Голованова, Б.Н. Ардашников, Г.М. Ковальзон // Абразивы. – 1982. – № 7. – С. 1–6.
84. Голованова, М.Н. Оценка эксплуатационных показателей микропорошков / М.Н. Голованова, В.В. Равикович // Абразивы. – 1979. – № 3. – С. 6–7.
85. ГОСТ 21445–84 Материалы и инструменты абразивные. Обработка абразивная. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 25 с.
86. ГОСТ 25751–83 Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий. – М.: Госкомстандарт СССР, 1990. – 28 с.
87. ГОСТ 4.349–85 Инструмент абразивный. Номенклатура показателей. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. – 7 с.
88. ГОСТ Р 52588–2006 Инструмент абразивный. Требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2007. – 18 с.
89. ГОСТ Р 52781–2007 Круги шлифовальные и заточные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 30 с.
90. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, П.П. Грудов, В.А. Кривоухов, М.Н. Ларин, А.Я. Малкин. – М.: Машгиз, 1954. – 472 с.
91. Гриднев, В.Н. Методика испытания абразивных паст / В.Н. Гриднев, Э.В. Анисимов, А.З. Рамм // Абразивы. – 1976. – № 8. – С. 7–10.

92. Гузеев, В.И. Влияние пульсации напряженного состояния режущего инструмента на его стойкость / В.И. Гузеев // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. – Челябинск, 1976. – С. 10–12.

93. Гурьянихин, В.Ф. Управление процессом круглого наружного врезного шлифования с использованием акустического сигнала / В.Ф. Гурьянихин, В.В. Агафонов, А.А. Панков // СТИН. – 2009. – № 2. – С. 34–40.

94. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / Под ред. С.В. Шухардина. – М.: Наука, 1979. – 248 с.

95. Доброхотов, Н.Н. Применение термодинамики в металлургии / Н.Н. Доброхотов. – Киев: Из-во Академии наук УкрССР, 1955. – 74 с.

96. Довгаль, А.Г. Влияние времени размола на структуру и износостойкость керамических материалов на основе системы $\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$ в паре с керамическим контртелом / А.Г. Довгаль // Проблемы трибологии. – 2012. – № 1. – С. 20–26.

97. Дружинина, З.И. Влияние импрегнаторов на эксплуатационные свойства шлифовальных кругов / З.И. Дружинина, И.И. Романец // Абразивы. – 1979. – № 10. – С. 6–8.

98. Дыхнов А.Е. Планирование эксперимента: учебное пособие / А.Е. Дыхнов, А.В. Геренштейн, А.А. Кошин А.А. – Челябинск, 1976. – 91 с.

99. Дьяконов, А.А. Имитационное моделирование процессов шлифования на основе применения высокопроизводительных кластеров и технологий параллельных вычислительных процессов / А.А. Дьяконов, Д.В. Ардашев, А.В. Лепихов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/2. – С. 29–34.

100. Дьяконов, А.А. Исследование износа режущего профиля шлифовальных кругов: магистерская диссертация / А.А. Дьяконов. – Челябинск, 2005. – 122 с.

101. Дьяконов, А.А. Исследование обрабатываемости материалов – эффективный путь повышения производительности процесса шлифования / А.А. Дьяконов // СТИН. – 2012. – №3. – С. 25–29.

102. Дьяконов, А.А. Комплексное моделирование процесса плоского шлифования периферией круга / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2013. – № 6. – С. 14–18.

103. Дьяконов, А.А. Оценка обрабатываемости материалов в процессах шлифования: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Дьяконов Александр Анатольевич. – Челябинск, 2006. – 253 с.

104. Дьяконов, А.А. Практическая реализация теории технологической обрабатываемости материалов в процессах абразивной обработки / А.А. Дьяконов, А.А. Кошин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 6–3(290). – С. 18–25.

105. Дьяконов А.А. Разработка научно-методической базы повышения эффективности процессов абразивной обработки на основе многофакторной оценки обрабатываемости материалов: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.07 / Дьяконов Александр Анатольевич. – Челябинск, 2012. – 386 с.

106. Евсеев, Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1978. – 128 с.

107. Евсиович, Э.С. Математическое и программное обеспечение сравнительных испытаний шлифовальных кругов на автоматизированном испытательном комплексе АИК / Э.С. Евсиович // В сб. «Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении», Ленинград, 1981. – С. 183–184.
108. Еленский, В.А. Влияние режимов скоростного бесцентрового шлифования на удельную производительность абразивного инструмента / В.А. Еленский, В.В. Марченко, И.Т. Давыдов // Абразивы. – 1973. – № 11. – С. 12–16.
109. Есаулов, И.В. Физико-механические свойства и шлифующая способность инструмента из эльбора / И.В. Есаулов, В.С. Миротворский, Г.В. Хоромова // Абразивы. – 1978. – № 11. – С. 6–8.
110. Журков, С.Н. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения / Некоторые проблемы прочности твердого тела // С.Н. Журков, Э.Е. Томашевский. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 214 с.
111. Журков, С.Н. Температурная и временная зависимость прочности полимерных волокон / С.Н. Журков, С.А. Абасов // Высокомолекулярные соединения. – 1961. – № 3. С. 441–449.
112. Зорев, Н.Н. Развитие науки о резании металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
113. Зубарев, Ю.М. Повышение производительности при шлифовании сталей и сплавов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев, В.В. Звоновских. – Л.: ЛДНТП, 1991. – 28 с.
114. Зубарев, Ю.М. Эффективность высокоскоростного плоского шлифования сталей электрокорундовыми шлифовальными кругами / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев, В.В. Звоновских // Абразивы. – 1981. – № 6. – С. 1–6.
115. Иванов, А.А. Оптимизация принятия решений при реализации технологических процессов механообработки в условиях многономенклатурных производств / А.А. Иванов, П.Ю. Бочкарев // Международный независимый институт Математики и Систем «МиС». Ежемесячный научный журнал. – 2015. – № 7 (18). – С. 13–22.
116. Иванов, А.А. Управление реализацией технологических процессов механообработки с учетом динамического состояния производственных систем / А.А. Иванов, Б.М. Бржозовский, П.Ю. Бочкарев // Динамика технических систем: сб. трудов XII межд. научно-технич. конференции. – Ростов-на-Дону, 2016. – С. 132–138.
117. Иванов, А.А. Формализация задачи составления оптимального плана реализации технологических процессов механообработки в многономенклатурном производстве / А.А. Иванов, П.Ю. Бочкарев // Вестник Саратовского гос. техн. университета. – 2011. – № 2, том 2. – С. 61–69.
118. Иванов, Ю.И. Эффективность шлифования лепестковыми кругами / Ю.И. Иванов, Н.В. Носов, А.Н. Исаков // Абразивы. – 1982. – № 2. – С. 8–12.
119. Ивашинников, В.Т. Исследование режущих свойств кругов различных номеров структур применительно к шлифованию коленчатых валов: автореф.

дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Ивашильников Валентин Трофимович. – Челябинск, 1972. – 24 с.

120. Исаев, А.И. Исследование сил и температуры при шлифовании / А.И. Исаев, С.С. Силин // Исследование процессов высокопроизводительной обработки металлов резанием: сб. науч. тр. – М.: Изд-во оборонной промышленности. – 1959. – С. 5–13.

121. Исаев, А.И. Методика расчета температур при шлифовании / А.И. Исаев, С.С. Силин // Вестник машиностроения. – 1957. – № 5. – С. 15–17.

122. Исаков, Д.В. Задачи паспортизации шлифовальных кругов / Д.В. Исаков, А.В. Выбойщик // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1996. – С. 18–22.

123. Исаков, Д.В. Моделирование рельефа рабочей поверхности шлифовального круга / Д.В. Исаков // Прогрессивные технологии в машиностроении. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1996. – С. 48–52.

124. Исаков, Д.В. Научные основы проектирования операций шлифования по результатам системных испытаний шлифовальных кругов / Д.В. Исаков. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 216 с.

125. Исаков, Д.В. Проектирование производительных шлифовальных операций на основе расчетного определения эксплуатационных свойств шлифовальных кругов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Исаков Денис Владиславович. – Челябинск, 2000. – 165 с.

126. Исаков, Д.В. Проектирование эффективных циклов шлифования с учетом эксплуатационных возможностей шлифовального круга / Д.В. Исаков // Тезисы к I-ой международной конференции «Машиностроение. Прогрессивные технологии». – Челябинск, 1998. – С. 48–49.

127. Исаков, Д.В. Экспериментально-расчетный метод определения средней площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью заготовки / Д.В. Исаков, Д.В. Ардашев, А.А. Дьяконов // Абразивное производство: сб. науч. тр. – Челябинск, изд-во «Атоксо», 2008. – С. 29–32.

128. Калинин, А.Д. Моделирование на ЭВМ цикла силового шлифования с учетом износа круга / А.Д. Калинин, Б.Н. Байор // Параметрическая оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента при шлифовании: тезисы докладов семинара «Оптимшлифабразив». – Челябинск, 1978. – С. 72–73.

129. Калинин, Е.П. Максимальная контактная температура в зоне шлифования / Е.П. Калинин, В.Д. Архипов // Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении: Труды II международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). – 2008. – С. 289–293.

130. Калинин, Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента / Е.П. Калинин. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 358 с.

131. Калитис, Р.А. Измерение радиальной составляющей силы резания при профильном шлифовании / Р.А. Калитис, Р.В. Строчкус, П.С. Штрюпкус // Абразивы. – 1974. – № 12. – С. 25–27.

132. Каминская, В.В. Оптимизация технологического процесса при обработке на круглошлифовальных станках с ЧПУ / В.В. Каминская, Л.Н. Цейтлин,

Л.В. Марголин // Параметрическая оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента при шлифовании: тезисы докладов семинара «Оптимшлифабразив». – Челябинск, 1978. – С. 65–68.

133. Караченцева, Т.Г. Оптимизация характеристики и конструктивных параметров скоростных шлифовальных кругов / Т.Г. Караченцева, В.И. Пилинский, Ю.Ф. Юликова, Г.П. Зайцев // В сб. «Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении». – Ленинград, 1981. – С. 110–112.

134. Караченцева, Т.Г. Расчет напряжений в скоростных составных шлифовальных кругах и выбор их рациональной конструкции / Т.Г. Караченцева, В.И. Пилинский, Ю.Ф. Юликова, Г.П. Зайцев // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: сб. научных статей. – Свердловск, 1982. – С.19–24.

135. Кардашин, Л.И. Выбор смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании высоклегированных быстрорежущих сталей / Л.И. Кардашин, Ю.Б. Редозуб, Ю.Г. Воронин // Абразивы. – 1972. – № 7. – С. 11–14.

136. Кащук, В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кащук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.

137. Кимяшов, А.А. Фазовые равновесия в системах Fe–Al–O и Fe–Si–O в интервале температур 1100 – 1300 К: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04 / Кимяшов Александр Анатольевич. – Челябинск, 2010. – 139 с.

138. Киселев, Е.С. Исследование возможности повышения эффективности круглого наружного скоростного шлифования путем рационального использования смазочно-охлаждающих жидкостей: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Киселев Евгений Степанович. – Саратов, 1977. – 292 с.

139. Ключко, В.И. Эффективность высокоскоростного шлифования разных сталей и сплавов с учетом точности и качества обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Ключко Валентин Иванович. – Челябинск, 1984. – 205 с.

140. Клушин, М.И. Резание металлов / М.И. Клушин. – М.: Машгиз, 1953. – 432 с.

141. Козлов, А.М. Моделирование поверхности абразивного инструмента и ее взаимодействия с обрабатываемым изделием / А.М. Козлов // Моделирование технологических процессов абразивной обработки / Г.В. Барсуков, Л.Г. Вайнер, Ю.В. Василенко и др. – М.: Спектр, 2011. – Разд. 5. – С. 187–222.

142. Комплекс научно-исследовательских работ по исследованию режущих свойств абразивных инструментов [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.): / Уральский НИИ абразивов и шлифования; рук. Ардашев Д.В. ; исполн.: Уразбахтин Б.Ф. [и др.] – Челябинск, 2010. – 66 с.

143. Копылов, Л.В. Применение математических методов для формирования аналитических зависимостей показателей процесса шлифования / Л.В. Копылов // В сб. «Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении». – Ленинград, 1981. – С. 129–132.

144. Коротков, А.Е. Повышение работоспособности отрезных шлифовальных кругов / А.Е. Коротков, Г.М. Дубов. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2005. – 155 с.

145. Корчак, С.Н. Виды разрушения абразивных зерен при шлифовании и методы их определения / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, В.И. Клочко, П.П. Переверзев // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: сб. научных статей. – Свердловск, 1982. – С. 34–45.

146. Корчак, С.Н. Выбор характеристики шлифовального круга / С.Н. Корчак // Высокопроизводительное шлифование. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – С. 99–104.

147. Корчак, С.Н. Моделирование работоспособности кругов разных характеристик и методика выбора кругов и режимов в общемашиностроительных нормативах режимов шлифования / С.Н. Корчак, П.П. Переверзев, Г.И. Буторин, А.А. Кошин // Параметрическая оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента при шлифовании: тезисы докладов семинара «Оптимшлифабразив». – Челябинск, 1978. – С. 3–11.

148. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

149. Корчмарь, Ф.Я. Особенности эксплуатации широких абразивных лент при обработке профильных поверхностей / Ф.Я. Корчмарь, Л.Н. Хшиво, А.М. Сарайкин // Абразивы. – 1975. – № 8. – С. 17–22.

150. Корчмарь, Ф.Я. Стенд для исследования процесса шлифования деталей сложного профиля широкими лентами / Ф.Я. Корчмарь, В.И. Стрижов // Абразивы. – 1972. – № 10. – С. 11–14.

151. Костецкий, Б.И. Стойкость режущих инструментов / Б.И. Костецкий. – М.: Машгиз, 1979. – 158 с.

152. Котляров, О.Ф. Исследование работоспособности шлифовальных фибровых дисков / О.Ф. Котляров, С.К. Розин // Абразивы. – 1977. – № 5. – С. 1–3.

153. Кошин, А.А. Влияние времени шлифования на эксплуатационные показатели шлифовального круга / А.А. Кошин, Д.В. Ардашев // Абразивное производство: сб. научн. трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – С. 56–61.

154. Кошин А.А. Исследование функциональных связей между предельными режимами и тепловыми критериями процессов алмазно-абразивной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Кошин Анатолий Александрович. – Челябинск, 1974. – 187 с.

155. Кошин, А.А. Кибернетические аспекты нормативных рекомендаций по режимам резания в технологических процессах машиностроения / А.А. Кошин, Н.С. Сазонова // Актуальные научные исследования: материалы VII международной научно-практической конференции. – Прага, 2011. – С. 19–22.

156. Кошин, А.А. Работоспособность шлифовальных кругов 24A25HSM27K при обработке хромоникелевых сплавов / А.А. Кошин, Д.В. Ардашев, Б.Ф. Уразбахтин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. научн. трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 34–39.

157. Кошин, А.А. Эффективность карт-номограмм для представления информации в нормативных справочниках времени и режимов резания / А.А. Кошин, Н.С. Сазонова // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. – С. 120.–126.

158. Кошин, А.А. Эффективность применения нормативных картограмм для проектирования операций сверления / А.А. Кошин, Н.С. Сазонова // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. – С. 194–197.

159. Кравченко, Ю.Г. Влияние химического состава корундовых материалов на показатели процесса шлифования быстрорежущих сталей группы W–Co–V–Mo / Ю.Г. Кравченко, Ю.Н. Логинов, А.В. Гордеев // Абразивы. – 1976. – № 6. – С. 4–6.

160. Кравченко, Ю.Г. Работоспособность высокопористых кругов при заточке быстрорежущего инструмента / Ю.Г. Кравченко // Абразивы. – 1977. – № 12. – С. 1–3.

161. Кремень, З.И. Методика автоматизированных испытаний абразивного инструмента с целью оценки его эксплуатационных характеристик / З.И. Кремень, И.Х. Стратиевский, Г.Ш. Ройтштейн // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента: тезисы докладов. – Челябинск, 1978. – С. 27–28.

162. Кремень, З.И. Эффективность применения абразивных кругов, пропитанных серой, при внутреннем врезном шлифовании колец подшипников / З.И. Кремень, Г.П. Афанасьева, А.Я. Зецеров, А.Н. Лукницкий, Е.И. Карпова // Абразивы. – 1972. – № 3. – С. 15–16.

163. Крестовников, А.Н. Химическая термодинамика / А.Н. Крестовников, В.Н. Вигдорович. – М.: Гос. изд-во лит-ры по черной и цв. Metallургии, 1962. – 280 с.

164. Кузнецов, А.А. Определение силы резания, действующей на единичную режущую кромку изношенного абразивного зерна [Электронный ресурс] / А.А. Кузнецов, В.В. Федотов // Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы. – Самара СамГТУ, 2009. – Режим доступа: http://www.sstu.syzran.ru/MECHF AK/downloads/ntt/kuznecov_fedotov.pdf

165. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования абразивных инструментов / В.И. Курдюков. – Курган: Изд-во КГУ, 2005. – 159 с.

166. Курносов, А.Д. Оценка работоспособности шлифовальных кругов, разработанных для АвтоВАЗа взамен импортных / А.Д. Курносов, А.П. Рожкова, Л.И. Богачева, Н.С. Нефедова / Абразивы. – 1976. – № 8. – С. 10–15.

167. Курносов, А.П. Абразивные инструменты и шлифование: справочник / А.П. Курносов. – Челябинск: Абразивы Урала, 2000. – 96 с.

168. Курносов, А.П. Оптимизация рецептурно-технологических параметров при изготовлении скоростных отрезных кругов / А.П. Курносов, В.А. Борисов // В сб. «Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении». – Ленинград, 1981. – С. 140–142.

169. Курносов, А.П. Оценка уровня качества шлифовальных кругов в процессе их освоения / А.П. Курносов, В.П. Денисенко, А.В. Косолапов // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: сб. научных статей. – Свердловск, 1982. – С. 95–99.

170. Лавров, И.В. Морфологическая характеристика остроты шлифовального круга / И.В. Лавров, Л.А. Лобанова // Абразивы. – 1973, № 12. – С. 5–8.

171. Лавров, И.В. О взаимодействии карбида кремния, корунда и бадделеита с металлами / И.В. Лавров // Абразивы. – 1974. – № 8. – С. 13–15.
172. Ливерант, Г.И. Исследование нормального электрокорунда и взаимодействие его с керамической связкой в процессе изготовления абразивного инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Ливерант Галина Исаевна. – Днепропетровск, 1974. – 22 с.
173. Линдунен, Л.И. Некоторые вопросы исследования информационной подсистемы автоматизированного испытательного комплекса / Л.И. Линдунен // Труды ВНИИАШ. – 1977. – № 21. – С. 17–25.
174. Логинов, В.Н. Электрические измерения механических величин / В.Н. Логинов. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.
175. Лоладзе, Т.Н. Износ режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машгиз, 1958. – 536 с.
176. Лоладзе, Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
177. Лоладзе, Т.Н. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава // Труды ВНИИАШ. – 1965. – № 1. – С. 86–94.
178. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
179. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
180. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3-х т./ Н.П. Лякишев. – М.: Машиностроение, 1996.
181. Манунин, В.П. Эксплуатационные характеристики зубчатых хонов на различных связках / В.П. Манунин, Ю.С. Багайсков // Абразивы. – 1976. – № 5. – С. 4–6.
182. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
183. Маслов, Е.Н. Основные закономерности высокопроизводительного шлифования / Е.Н. Маслов // Высокопроизводительное шлифование. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – С. 3–17.
184. Маталин, А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства шлифовальных кругов / А.А. Маталин. – М.: Машгиз, 1958. – 204 с.
185. Махаринский, Е.И. Исследование методов оценки качества шлифовальных кругов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1965. – 21 с.
186. Мацуо, Т. Выбор шлифовального круга для обдирочного шлифования сталей и чугунов / Т. Мацуо, К. Накасако // Конструирование и технология машиностроения. – 1988. – № 1. – С. 1–10.
187. Мгеладзе, В.Ф. Исследование прочности, шлифующей способности и насыпного веса промышленного зерна эльбора / В.Ф. Мгеладзе // Абразивы. – 1973. – № 1. – С. 1–4.

188. Медведева, О.И. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 5. – С. 14–19.
189. Мишнаевский, Л.Л. Износ шлифовальных кругов / Л.Л. Мишнаевский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 188 с.
190. Мищенко, Л.Д. Шлифование мелких резьб эльборовыми кругами на керамической связке / Л.Д. Мищенко // Абразивы. – 1972. – № 7. – С. 15–16.
191. Мурдасов, А.В. Повышение производительности и стойкости абразивного инструмента путем проектирования его строения с учетом требований и особенностей операции / А.В. Мурдасов // В сб. «Прогрессивные методы шлифования». – Челябинск, 1975. – С. 25–42.
192. Мурдасов, А.В. Факторы повышения эффективности операций силового шлифования / А.В. Мурдасов // Абразивы. – 1981. – № 1. – С. 1–3.
193. Мусин, Р.А. Соединение металлов с керамическими материалами / Р.А. Мусин, Г.В. Конюшов. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
194. Муцянюк, В.И. Влияние размеров круга на его эксплуатационные свойства / В.И. Муцянюк, А.Г. Неижкаша, И.Т. Давыдов // Абразивы. – 1978. – № 5. – С. 2–3.
195. Муцянюк, В.И. Исследование износа абразивных кругов при шлифовании литых магнитных сплавов / В.И. Муцянюк, В.Е. Гуринов // Абразивы. – 1972. – № 7. – С. 16–19.
196. Муцянюк, В.И. Коэффициент шлифования как критерий оценки процесса / В.И. Муцянюк, В.И. Островский // Труды ВНИИАШ. – 1965. – № 1. – С. 64–66.
197. Муцянюк, В.И. Некоторые показатели эффективности бесцентрового шлифования магнитного сплава ЮНДК24 в зависимости от скорости резания / В.И. Муцянюк, Э.Г. Зайцев, Ю.В. Гусев // Абразивы. – 1973. – № 11. – С. 17–18.
198. Муцянюк, В.И. Разработка методик оценки качества шлифовальных кругов / В.И. Муцянюк, А.Г. Неижкаша // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента: тезисы докладов. – Челябинск, 1978. – С. 35–37.
199. Муцянюк, В.И. Ускоренные эксплуатационные испытания шлифовальных кругов / В.И. Муцянюк, Б.И. Никулкин, Д.Ф. Шпотаковский // Абразивы. – № 3. – 1976. – С. 4–7.
200. Наерман, М.С. Справочник молодого шлифовщика / М.С. Наерман, Я.М. Наерман, А.Э. Исаков. – М.: Высш. шк., 1991. – 207 с.
201. Назарьева, В.А. Сетевая модель выбора зернистости шлифовальных кругов с элементами использования систем искусственного интеллекта / В.А. Назарьева // СТИН. – 2016. – № 2. – С. 37–40.
202. Никифоров, В.А. Шлифование жаропрочных сплавов / В.А. Никифоров, В.А. Носенко, Г.И. Саютин // Абразивы. – 1982. – Вып. 12. – С. 5–7.

203. Никулкин, Б.И. Влияние пропитки шлифовальных кругов на некоторые параметры процесса шлифования / Б.И. Никулкин // Абразивы. – 1972. – № 12. – С. 10–13.

204. Никулкин, Б.И. Экспериментальные исследования эксплуатационных свойств шлифовального круга с переменной характеристикой / Б.И. Никулкин // Абразивы. – 1980. – № 5. – С. 4–6.

205. Носенко, В.А. Вероятности видов изнашивания вершин зёрен круга и их зависимость от силы контактного взаимодействия и твердости абразивного инструмента / В.А. Носенко, М.В. Даниленко // Известия ВолгГТУ. – 2009. – Т. 8. – № 5. – С. 20–23.

206. Носенко, В.А. Вероятности разновидностей изнашивания зерен абразивного инструмента при шлифовании / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, С.В. Носенко, М.В. Даниленко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М., 2009. – 63–71.

207. Носенко, В.А. Влияние контактных процессов на износ круга при шлифовании / В.А. Носенко // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17–18. – С. 162–167.

208. Носенко, В.А. Определение износа шлифовальных зерен скалыванием и закона его распределения / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 8. – С. 43–48.

209. Носенко, В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – Старый Оскол: ТНГ, 2013. – 616 с.

210. Носенко, С.В. Изменение концентрации химических элементов по глубине поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании кругом из карбида кремния без охлаждения / С.В. Носенко, В.А. Носенко, Л.Л. Кременецкий // Вестник машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 64–66.

211. Носов, П.С. Банк данных режимов круглого наружного врезного шлифования / П.С. Носов // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента: тезисы докладов. – Челябинск, 1978. – С. 18–20.

212. Носов, П.С. К вопросу организации банка данных по статистическим характеристикам режимов шлифования / П.С. Носов, Г.Ш. Ройштейн. – Челябинск, УДНТП общества «Знание», 1978.

213. Носова, И.В. Влияние физико-химических реакций в контакте абразивное зерно-металл на показатели шлифования / И.В. Носова, В.М. Шумячер // Технология машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 14–17.

214. Области применимости различных расчетных схем в теплофизике шлифования / А.А. Кошин, С.А. Фадюшин, Т.Я. Лончинская, Л.В. Пушкарева // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1976. – С. 32–35.

215. Обработка на токарных станках: наладка, режимы резания: справочник / Д.В. Ардашев, В.А. Алабердин, С.А. Богатенков, Г.И. Буторин и др. // Под общ. ред. А.А. Кошина. – Челябинск: Сити-Принт, 2012. – 744 с.

216. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного на работы,

выполняемые на металлорежущих станках. Среднесерийное и крупносерийное производство. – М.: ЦБНТ, 1984. – 470 с.

217. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного при работе на металлорежущих станках. Мелкосерийное и единичное производство: справочник. – М.: НИИ Труда Госком Труда СССР, 1962. – 311 с.

218. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть 3: Протяжные, шлифовальные и доводочные станки. Изд-е 3-е. – М.: Изд-во ЦБНТ при НИИ Труда, 1978. – 360 с.

219. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках. Изд-е. 2-е. – М.: ЦБНТ, 1967. – 203 с.

220. Орлова, Т.Н. Повышение эффективности обработки отрезными бакелитовыми кругами путем совершенствования их физико-механических характеристик: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Орлова Татьяна Николаевна. – Саратов, 2006. – 147 с.

221. Пат. 107996 Российская Федерация, МПК В 24 В 49/00. Система измерения эксплуатационных показателей абразивного инструмента [Текст] / Д.В. Ардашев, А.А. Кошин.; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2011106953/02; заявл. 24.02.2011; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25. – 5 с.: ил.

222. Пат. 113362 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/00. Стенд для исследования взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки [Текст] / Д.В. Ардашев, А.А. Дьяконов, А.А. Кошин.; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2011141414/28; заявл. 12.10.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. – 5 с.: ил.

223. Пат. 127923 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/58. Стенд для исследования многоциклового взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки [Текст] / Д.В. Ардашев.; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2012134174/28; заявл. 09.08.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 5 с.: ил.

224. Пат. 1826374 Российская Федерация, МПК⁶ В 24 В 49/00. Способ контроля режущей способности шлифовального круга. [Текст] / Д.М. Алексеенко, В.Н. Петренко, Г.В. Куно, И.Н. Пыжов.; заявитель и патентообладатель Сумский филиал Харьковскогго политехнического института им. В.И. Ленина. – № 4609516/08; заявл. 28.11.1988; опубл. 20.07.1995, Бюл. № 29.

225. Пат. 2081735 Российская Федерация, МПК⁶ В 24 В 55/02. Стенд для испытаний смазочно-охлаждающей жидкостей и шлифовальных кругов [Текст] / Н.И. Веткасов, В.В. Епифанов.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 94030351/02 заявл. 15.08.1994; опубл. 20.06.1997.

226. Пат. 2100795 Российская Федерация, МПК⁶ G 01 N 3/56. Способ определения износа шлифовального круга [Текст] / А.П. Глушенков.; заявитель и па-

тентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 94037644/28 заявл. 06.10.1994; опубл. 27.12.1997, Бюл. № 30.

227. Пат. 2151685 Российская Федерация, МПК⁷ В 24 В 49/00, В 24 В 53/00. Способ гидроаэродинамического контроля степени засаленности периферийной поверхности шлифовального круга [Текст] / Ю.С. Степанов, А.И. Тиняков, Ю.В. Василенко.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 99108257/02 заявл. 21.04.1999; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 33.

228. Пат. 2183547 Российская Федерация, МПК⁷ В 24 В 53/065. Устройство для правки фасонного алмазного шлифовального круга и способ подготовки устройства к проведению измерения рельефа рабочей поверхности [Текст] / В.М. Терехов.; заявитель и патентообладатель Подольский машиностроительный завод. – № 99122096/02 заявл. 21.10.1999; опубл. 20.02.2006.

229. Пат. 2185949 Российская Федерация, МПК⁷ В 24 В 49/12, G 01 Н 9/00. Способ измерения вибраций технологической системы при шлифовании [Текст] / Ю.С. Степанов, Б.И. Афонасьев, А.И. Тиняков, В.В. Бородин.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 200012850/02 заявл. 13.11.2000; опубл. 27.07.2002.

230. Пат. 2188119 Российская Федерация, МПК⁷ В 24 В 49/12, G 01 Н 9/00. Устройство бесконтактного измерения вибраций технологической системы при шлифовании [Текст] / Ю.С. Степанов, Б.И. Афонасьев, А.И. Тиняков, В.В. Бородин.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 2000128249/02 заявл. 13.11.2000; опубл. 27.08.2002.

231. Пат. 2322667 Российская Федерация. Устройство и способ для контроля шлифовальных кругов. [Текст] / Уиттл Нэвилл К., Тичман Мишель М.; заявитель и патентообладатель АЛКОА ИНК (US). – № 2006118306/28; заявл. 24.02.2004; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11. – 22 с.: ил.

232. Пат. 2370356 Российская Федерация, МПК⁷ В 24 В 49/18. Способ контроля работоспособности шлифовального круга [Текст] / А.Г. Иванов, Д.П. Салова, П.М. Салов, С.Б. Малеева.; заявитель и патентообладатель Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. – № 2007147692/02; заявл. 20.12.2007; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29. – 12 с.: ил.

233. Пат. 2397856 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 Q 17/09. Устройство для измерения составляющих силы резания [Текст] / В.М. Давыдов, А.П. Богачев, А.В. Никитенко.; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2009109873/02; заявл. 18.03.2009; опубл. 27.28.2010, Бюл. № 24. – 6 с.: ил.

234. Пат. 2398212 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 Н 3/58, В 24 D 3/00. Способ определения удельного износа шлифовального круга [Текст] / Н.И. Веткасов, Ю.М. Правиков, Л.И. Ефремов, А.В. Сизов.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 2008149211/02 заявл. 12.12.2008; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 10 с.: ил.

235. Пат. 2411446 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 В 5/08. Независимое измерительное устройство для шлифовальных станков [Текст] / Дж. Бозелли, Дж. Гв-М. Бавестрелли, Ф.С. Бьянкеззи, К. Тревизан.; заявитель и патентообладатель

Текинт компания техника интернационале С.П. А. (It). – № 2008105980/284 заявл. 26.07.2006; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25. – 8 с.: ил.

236. Пат. 2417149 Российская Федерация, МПК В 24 В 55/00. Электромагнитное устройство для предотвращения эксплуатационных дисбалансов торцовых шлифовальных кругов [Текст] / Р.В. Жигалов, В.Г. Гусев, П.С. Швагирев.; патентообладатель Жигалов Роман Валерьевич. – № 2009132252/02 заявл. 26.08.2009; опубл. 27.04.2011, Бюл. № 12. – 8 с.: ил.

237. Пат. 97078 Российская Федерация, МПК В 24 В 49/00. Система измерения эксплуатационных показателей абразивного инструмента [Текст] / Д.В. Ардашев, А.А. Кошин, Б.А. Чаплыгин.; заявитель и патентообладатель Уральский НИИ абразивов и шлифования. – № 2010114131/02; заявл. 09.04.2010; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 5 с.: ил.

238. Пашков, Д.В. Определение эксплуатационных свойств шлифовальных кругов с использованием акустического метода контроля и твердости / Д.В. Пашков, Л.В. Ходаков // Абразивы. – 1982. – № 2. – С. 4–8.

239. Переверзев П.П. Теория и расчет оптимальных автоматических циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 / Переверзев Павел Петрович. – Челябинск, 1999. – 293 с.

240. Пилинский, В.И. Выбор характеристик круга и режимов резьбошлифования по температурному критерию / В.И. Пилинский, С.А. Власов, Г.С. Хусаинов // Абразивы. – 1973. – № 8. – С. 20–22.

241. Полянсков, Ю.В. Взаимодействие абразивных зерен с металлом в процессе шлифования / Ю.В. Полянсков, Л.В. Худобин // Труды ВНИИАШ. – 1976. – № 20. – С. 62–70.

242. Полянсков, Ю.В. Выбор шлифовальных кругов с учетом электронных свойств объектов резания / Ю.В. Полянсков, Ю.М. Правиков // Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборной обработки в машиностроении: тезисы докладов. – Москва, 1979. – С. 51–52.

243. Попенкова, З.Н. Оценка режущей способности водостойкой бумажной шлифовальной шкурки / З.Н. Попенкова, М.А. Зайцева, А.А. Ломова // Абразивы. – 1975. – № 12. – С. 1–3

244. Попов, С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 246 с.

245. Попов, С.А. Установки для исследования режущих свойств высокопористых шлифовальных кругов / С.А. Попов, Р.В. Ананьян // Абразивы. – 1977. – № 8. – С. 4–6.

246. Приемьшев, А.В. Эффективность высокоскоростного плоского шлифования сталей электрокорундовыми шлифовальными кругами / А.В. Приемьшев, Ю.М. Зубарев, В.В. Звоновских // Абразивы. – 1981. – № 6. – С. 1–6.

247. Пташников, В.С. О приведенном кинематическом параметре шлифования / В.С. Пташников // Абразивы. – 1978. – № 5. – С. 4–6.

248. Пташников, В.С. Особенности методики определения количественной характеристики механизма износа круга из эльбора при шлифовании // В.С. Пташников, И.Я. Ривлин, Л.В. Денисова, Е.Д. Федорова // Абразивы. – 1980. – № 5. – С. 2–4.
249. Пташников, В.С. Силы резания при шлифовании труднообрабатываемых быстрорежущих сталей инструментами из эльбора и карбида кремния / В.С. Пташников // Абразивы. – 1973. – № 11. – С. 20–24.
250. Путилин, А. Б. Континуальные системы обработки информации / А.Б. Путилин. – М.: Квадрат-С, 2005. – 156 с.
251. Путилин, А.Б. Политрон (Использование в схемах преобразования информации) / А.Б. Путилин. – М.: Энергия, 1980. – 72 с.,
252. Пушкарев, О.И. Определение прочности абразивного зерна / О.И. Пушкарев, Е.В. Славина // СТИН. – 2008. – № 3. – С. 17–19.
253. Пушкарев, О.И. Определение режущей способности шлифматериалов при моделировании процессов абразивной обработки / О.И. Пушкарев, Г.М. Мальгинова, Е.В. Славина // СТИН. – 2008. – № 1. – С. 22–25.
254. Пушкарев, О.И. Прогнозирование работоспособности шлифматериалов по результатам микромеханических испытаний их зерен / О.И. Пушкарев, В.М. Шумячер // СТИН. – 2006. – № 3. – С. 14–17.
255. Разработка структуры и математического обеспечения сертификационного паспорта абразивного инструмента [Текст] : отчет о НИР (промежут.) : / Уральский НИИ абразивов и шлифования; рук. Буторин Г.И. ; исполн.: Ардашев Д.В. [и др.]. – Челябинск, 2002. – 88 с.
256. Райт, В.В. Работоспособность торцовых высокопористых шлифовальных кругов на бакелитовой связке / В.В. Райт // Абразивы. – 1981. – № 1. – С. 13–16.
257. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
258. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин и др. – Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2007. – 384 с.
259. Резников, А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
260. Розин, С.К. Контроль режущей способности шлифовальной шкурки / С.К. Розин, А.А. Пыльнев, Н.В. Сырейщикова // Абразивы. – 1979. – № 3. – С. 8–10.
261. Ройтбург, Ю.С. Аппаратура переработки информации в процессе контроля и исследования шлифовальных кругов / Ю.С. Ройтбург, Ж.С. Равва // Динамика, прочность, контроль и управление. – Куйбышев, 1972. – С. 265–280.
262. Ройштейн, Г.Ш. Некоторые общие требования к нормированию характеристик абразивных инструментов / Г.Ш. Ройштейн // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента: тезисы докладов. – Челябинск, 1978. – С. 8–13.

263. Руководящий технический материал. Круги шлифовальные. Методика работы с технологическим эксплуатационным паспортом. – Челябинск: Уральский НИИ абразивов и шлифования, 2004. – 24 с.

264. Руководящий технический материал. Круги шлифовальные. Методика разработки технологического эксплуатационного паспорта. – Челябинск: Уральский НИИ абразивов и шлифования, 2004. – 16 с.

265. Руководящий технический материал. Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов. – Челябинск: Уральский НИИ абразивов и шлифования, 2012. – 20 с.

266. Рыбаков, В.А. Основные направления работ в области оценки свойств и эксплуатационных характеристик абразивных инструментов / В.А. Рыбаков // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента: тезисы докладов. – Челябинск, 1978. – С. 3–4.

267. Рыкунов, Н.С. Требования к абразивным инструментам исходя из термомеханических явлений при глубинном шлифовании / Н.С. Рыкунов, Е.И. Сухов, Д.И. Волков // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Ленинград, 1981. – С. 72–73.

268. Савицкий, К.В. К вопросу о роли диффузионных явления в контакте «абразив-металл» в процессе шлифования / К.В. Савицкий, В.Н. Кашеев, М.А. Илющенко, А.Ф. Быконя // Труды ВНИИАШ. – 1967. – № 4. – С. 22–27.

269. Самсонов, Г.А. Исследование обработки титановых сплавов с использованием абразивных материалов на основе карбидов переходных металлов / Г.А. Самсонов, А.А. Адамовский, А.И. Безыкорнов, В.В. Уваров // Абразивы. – 1980. – № 3. – С. 8–10.

270. Саютин, Г.И. Влияние физико-химических явления на эффективность процесса шлифования / Г.И. Саютин, Н.И. Богомоллов, В.А. Носенко // Абразивы. – 1976. – № 10. – С. 6–9.

271. Саютин, Г.И. Насыщение поверхности титанового сплава кремнием при шлифовании / Г.И. Саютин, В.А. Носенко, Н.Ф. Ларионов // Абразивы. – 1980. – № 6. – С. 2–3.

272. Саютин, Г.И. Физико-химические явления в процессе шлифования титановых сплавов / Г.И. Саютин, В.А. Носенко, Н.Ф. Ларионов // Труды ВНИИАШ. – 1984. – № 29. – С. 23–33.

273. Саютин, Г.И. Шлифование деталей из сплавов на основе титана / Г.И. Саютин, В.А. Носенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 80 с.

274. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 11089 Российская Федерация. Имитационная стохастическая теплофизическая модель процесса шлифования [Текст] / А.В. Геренштейн, А.А. Кошин, А.А. Дьяконов.; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет – № 5245770251; заявл. 11.02.2008; опубл. 07.07.2008 // Инновации в науке и образовании, 2008. – № 7 (42). – С. 46.

275. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2010610052 Российская Федерация. Пространственная многокритериальная теплофизическая модель процессов абразивной обработки [Текст] / А.А. Дьяконов,

А.В. Геренштейн, А.А. Кошин.; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет – № 2009616027; заявл. 28.10.2009; опубл. 11.05.2010 // Инновации в науке и образовании, 2010. – № 6 (59). – С. 14.

276. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2012614009 Российская Федерация. Имитационная стохастическая модель формирования обработанной поверхности при плоском шлифовании периферией круга [Текст] / А.А. Кошин, Л.В. Шипулин.; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет – № 2012611638; заявл. 07.03.2012; за-регистр. 28.04.2012.

277. Сеничев, А.Н. Аналитический расчет режимов резания при алмазном глубинной шлифовании алюминиевых сплавов / А.Н. Сеничев, В.Н. Киселев, А.С. Ямников // СТИН. – 2011. – № 2. – С. 22–24.

278. Серховец, О.И. Моделирование на ЭВМ цикла силового шлифования с учетом износа круга / О.И. Серховец, А.В. Фесенко, А.С. Козырь // Параметрическая оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента при шлифовании: тезисы докладов семинара «Оптимшлифабразив». – Челябинск, 1978. – С. 51–54.

279. Серховец, О.И. Оптимизация условий эксплуатации круга при силовом шлифовании / О.И. Серховец, А.В. Фесенко, А.Д. Гелло // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Ленинград, 1981. – С. 52–54.

280. Силин, С.С. Расчетный метод выбора характеристик абразивного круга при глубинном шлифовании / С.С. Силин, Н.С. Рыкунов, Е.И. Сухов // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Ленинград, 1981. – С. 31–32.

281. Симсиве, Ж.В. Оценка адгезионного износа задней поверхности режущего инструмента при высокоскоростной механической обработке / Ж.В. Симсиве, А.В. Кутышкин, Д.Ц. Симсиве // СТИН. – 2012. – № 4. – С. 18–22.

282. Сиротин, В.П. Влияние строения круга на его эксплуатационные свойства / В.П. Сиротин, И.В. Харченко // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Челябинск, 1978. – С. 35–37.

283. Славин, А.В. Механохимические процессы взаимодействия абразивного инструмента и заготовки при шлифовании металла / А.В. Славин, В.М. Шумячер // Технология машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 29–32.

284. Славин, А.В. Научное обоснование выбора рациональных составов СОЖ при шлифовании: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.07 / Славин Андрей Вячеславович. – Саратов, 2016. – 281 с.

285. Солер, Я.И. Поиск оптимальной зернистости нитридборовых кругов при плоском шлифовании деталей из стали 06Х14Н6Д2МВТ-1 по микрорельефу поверхности в условиях моделирования нечеткой логики / Я.И. Солер, Н.М. Тием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. «Машиностроение». – 2015. – № 6. – С. 96–111.

286. Солер, Я.И. Многокритериальная оптимизация стратегии плоского шлифования деталей из коррозионностойких сталей кругами из кубического нит-

рида бора / Я.И. Солер, А.Б. Стрелков, Е.О. Репей // Инновационные технологические процессы изготовления деталей машин: сб. тр. IV Межд. научн-пр. конф. «Инновации в машиностроении». – 2013. – С. 179–182.

287. Солер, Я.И. Оценка режущих свойств кругов Norton из карбида кремния при маятниковом шлифовании алюминиевого сплава 1933Т2 по критерию макрогеометрии / Я.И. Солер, Н.Ч. Киен // Инновационные технологические процессы изготовления деталей машин: сб. тр. IV Межд. научн-пр. конф. «Инновации в машиностроении». – 2013. – С. 171–174.

288. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Т. 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 944 с.

289. Старков, В.К. Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профильном зубошлифовании / В.К. Старков, С.А. Рябцев, В.А. Поклад, В.С. Новиков, М. Кайзер, С.В. Костров // Технология машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 17–22.

290. Стандарт предприятия 774-04-2004. Круги шлифовальные. Эксплуатационные показатели. – Челябинск: Уральский НИИ абразивов и шлифования, 2004. – 32 с.

291. Стрельчук, Р.М. Математическая модель определения шероховатости поверхности при алмазном шлифовании / Р.М. Стрельчук // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2015. – № 68. – С. 48–55.

292. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

293. Сырейщикова, Н.В. Работоспособность шлифовальных шкур из покрытых шлифматериалов мелких зернистостей / Н.В. Сырейщикова, Ф.Я. Корчмарь, В.С. Ярков // Абразивы. – 1981. – № 8. – С. 16–18.

294. Тагиев, Э.А. Исследование работоспособности кубонитовых кругов при глубинной заточке инструментов из быстрорежущих сталей / Э.А. Тагиев, А.М. Гаджитов // Абразивы. – 1978. – № 12. – С. 2–5.

295. Торопов, Н.Ф. Разработка математической модели для оценки качества абразивного инструмента при автоматизированных испытаниях / Н.Ф. Торопов // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Ленинград, 1981. – С. 161–163.

296. Троицкий, Б.Б. О качестве поверхностного слоя деталей при плоском шлифовании / Б.Б. Троицкий // Высокопроизводительное шлифование. – М.: АН СССР, 1962. – С. 143–148.

297. Угликова, Н.С. Влияние некоторых факторов на растворимость электрокорунда в керамической связке в процессе термообработки абразивного инструмента / Н.С. Угликова, Е.Г. Новикова, А.А. Пыльнев // Абразивы. – 1972. – № 4. – С. 8–11.

298. Уманский, Я.С. Физическое металловедение / Я.С. Уманский, Б.Н. Финкельштейн, М.Е. Блантер и др. – М.: Metallurgizdat, 1949. – 430 с.

299. Унно, К. Выбор инструмента для обработки шлифованием с применением ЭВМ. Анализ изменения нагрузки в процессе шлифования / К. Унно // Кийкай гидзюку, 1978. – Т. 26. – № 5.
300. Уэда, Т. Исследование температуры абразивных зерен при шлифовании с помощью инфракрасного радиационного пирометра / Т. Уэда, А. Хосокава, А. Ямамото // Конструирование. – 1985. – № 2. – С. 109–116.
301. Федоров, В.В. Термодинамический метод оптимизации условий эксплуатации абразивного инструмента / В.В. Федоров, В.Я. Коршунов // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Ленинград, 1981. – С. 99–100.
302. Федоров, В.В. Энергетический подход к оценке эффективности процесса шлифования / В.В. Федоров, В.Я. Коршунов // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Челябинск, 1978. – С. 21–27.
303. Филимонов, Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л., Машиностроение, 1979. – 248 с.
304. Филимонов, Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 134 с.
305. Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель, под ред. С.В. Вонсовского. – Л.: Наука, 1972. – 424 с.
306. Фролов, В.В. Теоретические основы сварки / В.В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1970. – 592 с.
307. Ханов, А.М. Численное моделирование процессов контактного взаимодействия при абразивной обработке резиновых покрытий / А.М. Ханов, Л.Д. Сиротенко, Л.П. Шингель, Е.В. Матыгуллина, Е.О. Трофимов // СТИН. – 2016. – № 1. – С. 33–36.
308. Хиденчи-Макино. Вибрация как критерий затупления шлифовального круга при шлифовании закаленной стали. ЭИ ВИНТИ, серия «Автоматические линии и металлорежущие станки». – 1976. – № 36.
309. Христинин, В.В. Моделирование процесса шлифования / В.В. Христинин, В.А. Родионов, А.С. Пендюхов // Сб. тр. Всероссийской научно-технич. интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении». – 2012. – С. 124–126.
310. Худобин, Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
311. Худобин, Л.В. Пути совершенствования технологии шлифования / Л.В. Худобин. – Саратов: Приволжское кн. изд-во, 1969. – 213 с.
312. Худобин, Л.В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании / Л.В. Худобин. – М.: Машиностроение, 1971. – 214 с.
313. Худобин, Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

314. Худобин, Л.В. Эффективность СОЖ различных составов при скоростном шлифовании / Л.В. Худобин // *Машиностроитель*. – 1974. – № 10. – С. 28–30.

315. Хшиво, Л.Н. Оценка эксплуатационных свойств шлифовальных кругов на вулканитовой связке по деформациям вдавливания острого конуса / Л.Н. Хшиво // *Абразивы*. – 1975. – № 8. – С. 11–14.

316. Цокур, А.К. О математическом описании процесса шлифования быстрорежущих сталей в условиях временного дрейфа / А.К. Цокур, С.М. Песочин, А.И. Драевский // *Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении*. – Ленинград, 1981. – С. 134–136.

317. Цуканов И.Ю. Возможности уменьшения номенклатуры шлифовальных кругов для обработки винтовых канавок / И.Ю. Цуканов, Ф.А. Плотников // *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. – 2014. – № 2. – С. 12–15.

318. Чернышов, Н.А. Оптимизация характеристики рабочей поверхности шлифовальных кругов / Н.А. Чернышов, Г.И. Саютин, А.В. Шарабаев // *Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении*. – Ленинград, 1981. – С. 95–97.

319. Шамин, В.Ю. Исследование влияния окислительных процессов при электрохимическом шлифовании железоуглеродистых сплавов на производительность обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Шамин Владимир Юрьевич. – Челябинск, 1972. – 167 с.

320. Шамин, В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических цепей / В.Ю. Шамин. – Челябинск: Изд. Центр ЮУрГУ, 2005. – 530 с.

321. Шеин, А.В. Определение оптимальных режимов резания при шлифовании жаропрочных сталей и титановых сплавов / А.В. Шеин // *Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении*. – Ленинград, 1981. – С. 103–105.

322. Шендера, В. Технологическая подготовка производства: пути повышения эффективности / В. Шендера // *Сапр и графика*. – 2011. – № 9. – С. 32–37.

323. Шерман, А.Д. Чугун: справочник / А.Д. Шерман. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

324. Шипулин, Л.В. Совершенствование методики проектирования операций плоского шлифования периферией круга на основе комплексного имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Шипулин Леонид Викторович. – Челябинск, 2013. – 190 с.

325. Шорников, С.И. Термодинамические свойства расплавов системы $Al_2O_3-SiO_2$ [Электронный ресурс] / С.И. Шорников // *Вестник Отделения наук о Земле РАН*. – 2004. – № 1(22). – Режим доступа http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-/planet-9.pdf.

326. Шумячер, В.М. Работоспособность абразивных зерен электрокорундов при микрорезании материалов / В.М. Шумячер, Е.С. Данилова, И.О. Пушкарев // *СТИН*. – 2011. – № 6. – С. 18–20.

327. Щипанов, В.В. Выбор зернистости круга и режимов заточки инструмента из быстрорежущих сталей / В.В. Щипанов // *Оптимизация условий экс-*

плуатации и выбора характеристик абразивного инструмента в машиностроении. – Ленинград, 1981. – С. 50–52.

328. Щипанов, В.В. Шлифование труднообрабатываемых инструментальных сталей кругами из эльбора / В.В. Щипанов // Абразивы. – 1974. – № 7. – С. 19–23.

329. Юрьев, В.Г. Исследование изменения параметров шлифования с целью нормирования эксплуатационных характеристик абразивного инструмента / В.Г. Юрьев, Л.И. Линдунен, И.Х. Стратиевский // Оптимизация условий эксплуатации и выбора характеристик абразивного инструмента. – Челябинск, 1978. – С. 20–21.

330. Якимов, А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – Киев.: Вища школа, 1986. – 175 с.

331. Abrasive Engineering, 1970, № 3.

332. Aergens, R. Улучшение выбора характеристики резания / R. Arens // ВЦП. – 1977. – № А-5441. – 29 с.

333. Ardashev, D.V. Algorithmic model of the continuum design of grinding / D.V. Ardashev, V.I. Guzeev // Russian Engineering Research. – 2016. – № 11. – pp. 979–981.

334. Ardashev, D.V. Definition of abrasive grain wear upon grinding from the standpoint of the kinetic theory of strength / D.V. Ardashev // Journal of Friction and Wear. – 2015. – № 3. – pp. 266–272.

335. Ardashev, D.V. Group abrasive machining in flexible production // D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – № 4. – pp. 305–306.

336. Ardashev, D.V. Mathematic model of a blunting area of an abrasive grain in grinding processes, with account different wear mechanisms / D.V. Ardashev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – pp. 500–504.

337. Ardashev, D.V. Physicochemical wear of abrasive grains during grinding processes / D.V. Ardashev // Journal of Friction and Wear. – 2014. – № 4. – pp. 284–289.

338. Ardashev, D.V. Predicting the performance of abrasive tools in process design for diversified production / D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – № 3. – pp. 206–208.

339. Ardashev, D.V. Predicting the physicochemical wear of an abrasive grain in grinding // D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – № 5. – pp. 394–397.

340. Ardashev, D.V. Predicting the working life of abrasive grains // D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2015. – № 4. – pp. 302–304.

341. Ardashev, D.V. Prediction of intensity of physicochemical interaction of abrasive and workpiece material depending on the chemical composition of the material being machined / D.V. Ardashev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – pp. 505–509.

342. Ardashev, D.V. Recursive model of the blunting of an abrasive grain / D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2016. – № 9. – pp. 781–783.

343. Ardashev, D.V. Simulation of grinding with wear of the abrasive grains / D.V. Ardashev, L.V. Shipulin // *Russian Engineering Research*. – 2017. – № 2. – pp. 150–153.
344. Ardashev, D.V. Standardization of grinding wheels / D.V. Ardashev // *Russian Engineering Research*. – 2011. – № 9. – pp. 910-912.
345. Ardashev, D.V. Two-parameter assessment of grinding wheel performance / D.V. Ardashev // *Russian Engineering Research*. – 2010. – № 7. – pp.705–707.
346. Badger, J.A. Comparison of two models to predict the grinding force from wheel surface topography / J.A. Badger, A. Torrance // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2000. – vol. 40. – P. 1099–1120.
347. Bao, C. Effect of the cBN grit surface oxidation on grinding performance of the vitrified cBN tool // C. Bao, Y. Song, S. Hou, X. Yang, J. Yang, W. Yao // *Journal of Xi'an Jiaotong University*. – 2015. – Vol. 49. – P. 124–129.
348. Baranov, G.L. Influence of contact friction on the stress state of strip in drawing / G.L. Baranov // *Steel in Translation*. – 2014. – Vol. 44. – P. 460–465.
349. Bhattacharyya, S.K. Characteristics of micro wheel wear in grinding / S.K. Bhattacharyya, V.L. Moffatt // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. – 1976. – Vol. 16. – P. 325–334.
350. Bohm, C. Entwicklung und erprobung sensorintegrierter schleifwerkzeuge. / Dr.-Ing. Dissertation, Universitat Bremen, 2002.
351. Brinksmeier, E. Development and application of a wheel based process monitoring system in grinding / E. Brinksmeier, C. Heinzl, L. Meyer // *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. – 2005. – Vol. 54. – P. 301–304.
352. Brinksmeier, E. Monitoring of grinding wheel wear / E. Brinksmeier, F. Werner // *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. – 1992. – Vol. 41. – P. 373–376.
353. Butler, D.L. The characterisation of grinding wheels using 3D surface measurement techniques / D.L. Butler, L.A. Blunt, B.K. See J.A. Webster K.J. Stout // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – vol. 127. – P. 234–237.
354. Chen, X. Life cycle model of the grinding process / X. Chen, D.R. Allanson, W.B. Rowe // *Computers in Industry*. – 1998. – Vol. 36. – P. 5–11.
355. Chena, X. Simulation of grinding surface creation – A single grit approach / X. Chena, T.T. Öpözb // *Advanced Materials Research*. – 2010. – Vol. 126–128. – P. 23–28.
356. Dabrowski, L. Efficiency of special segmental grinding wheel / L. Dabrowski, M. Marciniak // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 109. – P. 264–269.
357. Darafon, A. 3D metal removal simulation to determine uncut chip thickness, contact length, and surface finish in grinding / A. Darafon, A. Warkentin, R. Bauer // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 66. – P. 1715–1724.
358. Deutsch, S.J. Analysis of mechanical wear during grinding by empirical-stochastic models / S.J. Deutsch // *Wear*. – 1974. – Vol. 29. – P. 247–257.

359. Ding, K. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide / K. Ding, Y. Fu, H. Su, X. Gong, K. Wu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 71. – P. 1929–1938.
360. Dornfeld, D.A. Neural network sensor fusion for tool condition monitoring / D.A. Dornfeld // *Annals of the CIRP*. – 1990. – Vol. 39. – P.101–105.
361. Durgumahanti Patnaik, U.S. A new model for grinding force prediction and analysis / U.S. Patnaik Durgumahanti, S. Vijayender, P. Venkateswara Rao // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2010. – Vol. 50. – P.231–240.
362. Dyakonov, A.A. Simulated stochastic thermo-physical model of grinding process / A.A. Dyakonov // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. – 2014. – vol. 2. – P. 914–917.
363. Fritsche, A. Experimental investigation of the heat flux distribution in grinding of titanium alloy / A. Fritsche, F. Bleicher // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 987–993.
364. Garcia, E. Complementary tribometers for the analysis of contact phenomena in grinding / E. Garcia, D. Meresse, I. Pombo, J-A Sanches, L. Dubar // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214. – P.1787–1797.
365. Gong, Y. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technologies / Y.D. Gong, B. Wang, W.S. Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 129. – P. 123–126.
366. Gopal, A.V. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding / A.V. Gopal, P.V. Rao // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43. – P. 1327–1336.
367. Graham, W. Fracture wear of grinding wheels / W. Graham, C.M. Voutsadopoulos // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. – 1978. – Vol. 18. – P. 95–103.
368. Hahn, R. On the basic relationship between grinding parameters / R. Hahn, R. Lindsay // *Annals of the CIRP*. – 1970. – vol. 18.
369. Haifeng, Ch. Modeling and predicting of surface roughness for generating grinding gear / Ch. Haifeng, T. Jinyuan, Z. Wei // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213. – P. 717– 721.
370. Hassui, A. Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission / A.E. Diniz, J.F.G. Oliveira, J. Felipe, J.J.F. Gomes // *Wear*. – 1998. – Vol. 217. – P.7–14.
371. Hitchiner, M.P. Some remarks on the chemical wear of diamond and cubic BN during turning and grinding / M.P. Hitchiner, J. Wilks // *Wear*. – 1987. – Vol. 114. – P. 327–338.
372. Horiuchi, O. Wear of diamond wheel in groove grinding of cemented carbide – Influences of speed ratio and nitrogen gas dissolved coolant / O. Horiuchi, T. Samura, T. Uno, T. Itazu, N. Ito, T. Shibata, M. Masuda // *17-th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, ISAAT*. – 2014. – Code 114819.
373. <http://abraziv174.ru/>
374. <http://abraziv-instrument.ru/katalog.html>
375. <http://baerhausen.de>

376. <http://carborundum.ru/>
377. <http://catm.ru/articles/shlifovanye-krugi-norton/>
378. <http://klingspor.com.ru/mini-krugi/#TABLE2>
379. <http://kosulino.ru/>
380. <http://sat-abraziv.ru/about/>
381. <http://sgabrasives.ru>
382. <http://solutions.3mrussia.ru/>
383. <http://www.abrasive.zp.ua/>
384. <http://www.abrasive-tech.com>
385. <http://www.abrasives.ru/>
386. <http://www.abraziv.su/>
387. <http://www.derkom.de>
388. <http://www.dronco.com>
389. <http://www.gleason.com>
390. <http://www.granitnet.hu>
391. <http://www.isma.ru/>
392. <http://www.kraz-chel.ru/>
393. <http://www.mirka.com/>
394. <http://www.molemab.com/>
395. www.niles.de/
396. <http://www.noritake-abrasives.com/>
397. http://www.online-tyrolit.ru/information/katalog-produkcii_5.html
398. <http://www.pazi.ru/choice.html>
399. <http://www.pferd.com/>
400. <http://www.rappold-winterthur.ru>
401. <http://www.reishauer.com>
402. <http://www.sia-abrasives.ru/>
403. <http://www.swatycomet.com/>
404. <http://www.tcm-international.com/en>
405. <http://www.toolgal.com>
406. <http://www.vabz.ru/>
407. <http://www.vsmag.de>
408. <http://www.yuaz.ru/>
409. Hundt, W. Model-based AE monitoring of the grinding process / W. Hundt, F. Kuster, F. Rehsteiner // CIRP Annals. Manufacturing Technology. – 1997. – Vol. 46. – P. 243–247.
410. Informationssystem fur schnittwerte / Industrie-Anzeiger. – 1971. – v. 93. – № 60.
411. Jermolajev, S. Experimental and analytical investigation of workpiece thermal load during external cylindrical grinding / S. Jermolajev, C. Heinzl, E. Brinksmeier // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 31. – P. 465–470.
412. Jianga, J.L. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process / J.L. Jianga, P.Q. Gea, W.B. Bia, L. Zhanga, D.X. Wanga, Y. Zhanga // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – Vol. 74. – P. 29–40.

413. Junkar, M. Identifying the grinding process by means of inductive machine learning / M. Junkar, B. Filipič, I. Bratko // *Computers in Industry*. – 1991. – Vol. 17. – P. 147–153.
414. Kahles, I. Applications of machinability data banks in industry / I. Kahles, M. Fild // *Proc. 14th Machine Tool Design Research Conference*. – 1973.
415. Karpuschewski, B. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors / B. Karpuschewski, M. Wehmeier, I. Inasaki // *Annals of the CIRP*. – 2000. – Vol. 49. – P. 235–240.
416. König, W. INFOS – Informationszentrum für Schnittwerte, Schleifen / W. König, E. Bottler // *Industrie-Anzeiger*. – 1978. – v. 101. – № 91.
417. Kumar, S. Prediction of wear and surface roughness in electro-discharge diamond grinding / S. Kumar, S.K. Choudhury // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 191. – P. 206–209.
418. Kwak, J-S. An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method // J-S. Kwak, S-B. Sim, Y-D. Jeong // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46. – P. 304–312.
419. LaChance, S. Development of an automated system for measuring grinding wheel wear flats / S. LaChance, A. Warkentin, R. Bauer // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2003. – Vol. 22. – P. 130–135.
420. Lang, X. Grinding force model based on prominent height of abrasive submitted to Rayleigh distribution / X. Lang, Y. He, J. Tang, H. Chen // *Journal of Central South University (Science and Technology)*. – 2014. – Vol. 45. – № 10. – P. 3386–3391.
421. Leonesio, M. A Time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monno // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 4. – P. 166–171.
422. Lezanski, P. An intelligent system for grinding wheel condition monitoring / P. Lezanski // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 109. – P. 258–263.
423. Li, X. Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis: diss. ... PhD: Manufacturing Engineering / Xuekun Li. – Worcester, 2010. – 132 p.
424. Lin, S. A new model of grinding forces prediction for machining brittle and hard materials / S. Lin, Y. Shuming, Y. Lin, Zh. Pu, W. Pengfei, J. Zhuangde // *Procedia CIRP*. – 2015. – vol. 27. – P. 192 – 197.
425. Manchao, Z. Optimization of roughness and residual stresses in path controlled grinding of crankpin / Z. Manchao, Y. Zhenqiang, X. Sheng // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 36. – P. 117 – 122.
426. Mao, K. Surface coating effects on contact stress and wear: an approach of surface engineering design and modeling / K. Mao, Y. Sun, A. Bloyce, H. Dong // *Surface Engineering*. – 2010. – Vol. 26. – № 1–2. – P. 142–148.
427. Maris, M. Analysis of plunge grinding operations / M. Maris, R. Snoeys, J. Peters // *Annals of CIRP*. – 1975. – vol. 24. – № 1.

428. Matsumoto, T. Monitoring of grinding process with a sensor integrated CBN wheel / T. Matsumoto, I. Inasaki // 5-th International Grinding Conference. – Cincinnati, Ohio. – 1993.
429. Meyer, L. Monitoring of grinding processes using a sensor equipped grinding wheel / L. Meyer, C. Heinzl, E. Brinksmeier // Production Engineering. – 2004. – Vol. 11. – P. 41–44.
430. Neugebauer, R. Reducing tool wear in abrasive cutting / R. Neugebauer, K.-U. Hess, S. Gleich, S. Pop // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – Vol. 45. – P. 1120–1123.
431. Nguyen, T. Simulation of surface grinding process, part 2: interaction of the abrasive grain with the workpiece / T.A. Nguyen, D.L. Butler // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – Vol. 45. – P. 1329–1336.
432. Pande, S.J. Wheel wear in dry surface grinding / S.J. Pande, G.K. Lal // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1976. – Vol. 16. – P. 179–186.
433. Peters, J. Coefficients caractéristiques pour le calcul du fini de surface et des efforts de coupe en rectification, cylindrique / J. Peters, A. Decneut, R. Aereus // Machin-Outul. – 1974. – № 308–310.
434. Peters, J. Le paiseur de coupe équivalente, paramètre déterminant en rectification / J. Peters, A. Decneut // Mécanique, matériaux, électricité. – 1975. – № 310. – P. 15–25.
435. Qiang, L. Empirical modelling of grinding force based on multivariate analysis / L. Qiang, X. Chen, Y. Wang, N. Gindy // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 203. – P. 420–430.
436. Rowe, W.B. An Intelligent Multiagent Approach for Selection of Grinding Conditions / W. B. Rowe, Y. Li, X. Chen, B. Mills // CIRP Annals. Manufacturing Technology. – 1997. – Vol. 46. – P. 233–238.
437. Rubenstein, C. The mechanics of grinding / C. Rubenstein // Int. J. Mach. Tool Des. and Res. – 1972. – № 2.
438. Rudrapati, R. Modeling and optimization of machining parameters in cylindrical grinding process / R. Rudrapati, P.K. Pal, A. Bandyopadhyay // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – vol. 82. – p. 2167–2182.
439. Rudrapati, R. Modeling for surface roughness in cylindrical grinding / R. Rudrapati, P.K. Pal, A. Bandyopadhyay // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2012. – vol. 12. – p. 28–36.
440. Salisbury, E.J. A three-dimensional model for the surface texture in surface grinding, part 1: surface generation model / E.J. Salisbury, K.V. Domala, K.S. Moon, M.H. Miller, J.W. Sutherland // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2001. – Vol. 123. – P. 576–581.
441. Salje, E. Technische Mitteilungen, IX–X. – 1952.
442. Salonitis, K. Grind hardening process / K. Salonitis. – Springer, 2015 – 95 p.
443. Sanchi, K.K. Predictive modeling of surface roughness in grinding / K.K. Sanchi, A. Sanjay // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 31. – P. 375 – 380.

444. Schulz, H. Process monitoring with mechatronic toolholders / H. Schulz, A. Versch, U. Fiedler // *Production Engineering*. – 2001. – Vol. 111. – P. 125–136.
445. Shengqiang, J. ADEM methodology for simulating the grinding process of SiC ceramics / J. Shengqiang, L. Tiantian, T. Yuanqiang // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 102. – P. 1803–1810.
446. Shi, Z. Wear of electroplated CBN grinding wheels / Z. Shi, S. Malkin // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2006. – № 1. – P. 110–118.
447. Shipulin, L.V. Complex model of surface grinding / L.V. Shipulin // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. – 2012 – P. 1325–1327.
448. Shvozaki, S. Dynamic und design of dynamometer / S. Shvozaki, M.K. Miyashita // *Annals of CIRP*. – 1970. – vol. 18. – p. 663–675.
449. Smits, C. Bestimmen von schleifergebnissen / C. Smith // *Technische Rundschau*. – 1973. – № 21.
450. Snoeys, R. Les limites de productivite en rectification / R. Snoes, M. Maris // *Mecanique, Materiaux, Electricite*. – 1975. – № 310.
451. Snoeys, R. The significance of chip thickness in grinding / R. Snoeys, J. Peters // *Annals of CIRP*. – 1974. – v.23. – № 2.
452. Susič, E. Characterization of the grinding process by acoustic emission / E. Susič I. Grabec // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2000. – Vol. 40. – P. 225–238.
453. Tang, J. Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding / J. Tang, J. Du, Y. Chen // *Journal of materials processing technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 2847–2854.
454. Taniguchi, N. Development of the grindability testing machine / N. Taniguchi, S. Ueno // *Annals of CIRP*. – 1973. – v. 22/1. – P. 95–96.
455. Tönshoff, H.K. Modelling and simulation of grinding processes / H.K. Tönshoff, J. Peters, I. Inasaki, T. Paul // *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. – 1992. – Vol. 41. – P. 677–688.
456. Tönshoff, H.K. Process monitoring in grinding / H.K. Tönshoff, T. Friemuth, J.C. Becker // *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. – 2002. – Vol. 51. – P. 551–571.
457. Varghese, B. In-process monitoring of truing using a sensor integrated diamond grinding wheel / B. Varghese, S. Pathare, R. Gao, C. Guo, S. Malkin // *Technical Paper, SME*. – 2002. – P. 1–8.
458. Varghese, B. Development of a sensor-Integrated "Intelligent" grinding wheel for In-process monitoring / B. Varghese, S. Pathare, R. Gao, C. Guo, S. Malkin // *Annals of the CIRP*. – 2000. – Vol. 49. – P. 231–234.
459. Warren, L.T. Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers / L.T. Warren, T. Fengming, J.Qu, P.J. Blau // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2008. – Vol. 22. – P. 217–232.
460. Wegener, K. Conditioning and monitoring of grinding wheels / K. Wegener, H.-W. Hoffmeister, B. Karpuschewski, F. Kuster, W.-C. Hahmann, M. Rabiey // *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 60. – P.757–777.

461. Xing, H.L. Finite element simulation of stress evolution in a frictional contact system / H.L. Xing, P. Mora, A. Makinouchi // *Lecture notes in Computer Science*. – 2003. – Vol. 2659. – P. 798–806.
462. Xuekun, L. Framework of grinding process modeling and simulation based on microscopic interaction analysis / Xuekun, L. Yiming Rong // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2011. – Vol. 27. – P. 471–478.
463. Yossifon, S. Wheel wear when grinding workpieces exhibiting high adhesion / S. Yossifon, C. Rubenstein // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. – 1982. – Vol. 22. – P. 159–176.
464. Zhang, K. Experimental study on internal cylindrical grinding of bearing steel with electrolytic in-process dressing grinding / K. Zhang, Y. Yu, W. Wang, H. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – vol. 81. – P. 1175–1185.
465. Zhou, X. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process / X. Zhou, F. Xi // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2002. – V. 42. – P. 969–977.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Аппаратное, методическое обеспечение и результаты экспериментальных исследований коэффициентов сродства абразивного и обрабатываемого материалов

1. Аппаратное обеспечение

Основным прибором является электронный сканирующий микроскоп JSM 6460LV (JEOL, США), оснащенный энергодисперсионной приставкой, позволяющей, в частности, провести полный качественный и количественный химический анализ в выбранных точках, а также получать карты распределений химических элементов по площади и вдоль выбранной линии. Общий вид микроскопа приведен на рисунке А.1.



Рисунок А.1 – Общий вид электронного микроскопа

Микроскоп может использоваться в минералогии, геологии, палеонтологии, металлургии, для разработки новых материалов, и предназначен для:

- осуществления в различных режимах растровой электронной микроскопии неровных поверхностей в низком и высоком вакууме с высоким разрешением до $300\,000\times$ (характера излома, трещиноватости, коррозии, морфологии продуктов износа объекта или его преобразования);
- исследования неоднородности образца за счет превосходного разрешения мелкомасштабных деталей в режиме композиционного контраста, экспресс-оценки соотношения различных фаз, неразрушающего рентгеновского микроанализа элементов;
- определения аморфного состояния или типа кристаллической решетки для 7 сингоний в отдельном участке поверхности образца с помощью Crystal-приставки;

- исследования неоднородных материалов методами линейного сканирования и EDS-картирования, в том числе процессов диффузии, характера изменения концентраций элементов вблизи границ фаз;
- исследования образцов в низковакуумном режиме работы без напыления токопроводящим слоем, в том числе стекла, керны со следами нефтепродуктов, геммологические образцы и т.д..

Основные характеристики микроскопа приведены в таблице А.1:

Таблица А.1 – Основные технические характеристики микроскопа

Параметр	Значение параметра
Ускоряющее напряжение, кэВ	0,3...30
Разрешение в режиме с низким вакуумом, ангстрем (нм)	40 (4,0)
Разрешение в режиме с высоким вакуумом, ангстрем (нм)	30 (3,0)
Увеличение в режиме с низким вакуумом	5...300 000
Увеличение в режиме с высоким вакуумом	5...300 000
Смена режима высокий/низкий вакуум	Автоматическая
Диапазон давлений в камере образцов в режиме низкого вакуума, Па	6...270
Система управления прибором	Персональный компьютер с ОС Windows2000, удобный и интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс
Детекторы изображений	SE, BE*
Возможности установки дополнительных детекторов и систем микроанализа	EDS, WDS**, EBSP CLD, CLDIR, BE, EMF
Столик для образцов	моторизованный с компьютерным управлением, 5-ти осевой
перемещение	
по оси X, мм	125
по оси Y, мм	100
по оси Z, мм	5...80
Наклон, °	-10...+90
Вращение, °	360
Максимальный размер образца, мм	200 (диаметр), 80 (толщина)
Апертурная диафрагма	Сменная, 3 позиции
Автоматические функции	Автофокусировка, автоконтраст-яркость, автостигматор

Для нагрева образцов и их последующей выдержки при различных температурах использовалась муфельная печь SNOL 15/1300 (АВ «UMEGA», Литва), общий вид которой показан на рисунке А.2.



Рисунок А.2 – Общий вид муфельной печи SNOL

Основные технические характеристики печи приведены в таблице А.2.

Таблица А.2 – Основные технические характеристики печи

Параметр	Значение параметра
Материал рабочей камеры	керамика
Нагревательные элементы	частично открытые
Терморегулятор OMRON (Япония)	электронный
Номинальная мощность, кВт:	6
Напряжение питающей сети, В:	380
Частота переменного тока, Гц:	50
Число фаз:	3
Диапазон регулирования температуры, °С:	50 - 1300
Стабильность температуры, °С:	+/- 2
Размеры рабочей камеры, мм	240x400x160
Габаритные размеры, мм	600x800x600
Масса печи, кг:	120

Цифровая обработка снимков, выполненных на электронном сканирующем микроскопе осуществлялась с помощью персонального компьютера и графических компьютерных программ.

2. Методическое обеспечение

В качестве исследуемых образцов были изготовлены кубики из чистого электрокорунда белого. Кубики вводились в контакт с плоскими образцами из различных марок сталей, при этом поверхность электрокорунда, контактируемая с образцом, должна быть достаточно ровной, чтобы обеспечить плотное прилегание

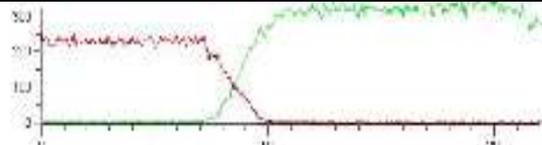
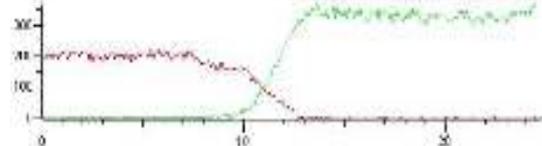
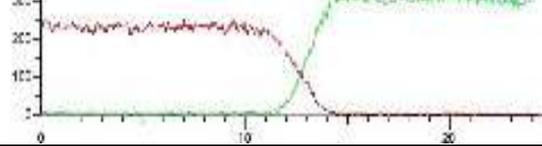
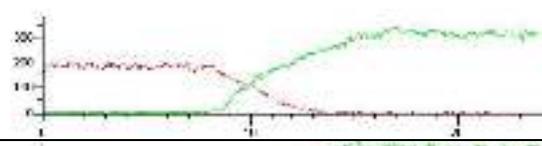
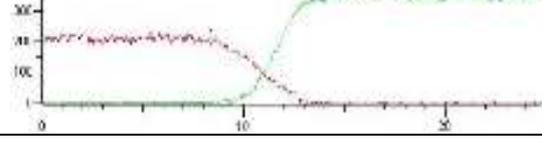
по всей площади контакта. Образцы помещались в печь, нагревались до различных температур (200, 400, 600, 800 и 1000 °С), выдерживались 2 часа и охлаждались на воздухе.

После предварительного исследования образцов под микроскопом из них изготавливались поперечные шлифы.

При помощи объектива камеры микроскопа находилась граница раздела материалов, перпендикулярно которой выполнялся линейный химический анализ в точках на различном расстоянии от границы. Строилась карта линейного химического анализа, по которой графическим способом при помощи накладывания фотоснимка на микрометрическую шкалу определяли начало и окончание третьего вещества – прослойки, образовавшейся в результате физико-химического взаимодействия двух материалов.

3. Результаты исследования

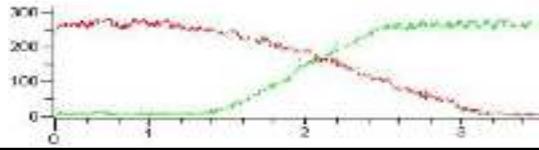
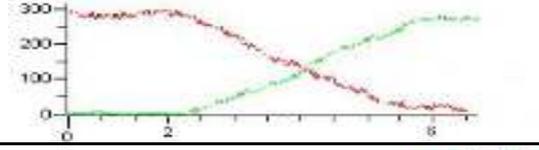
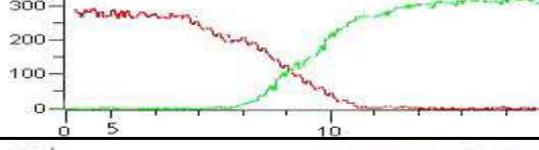
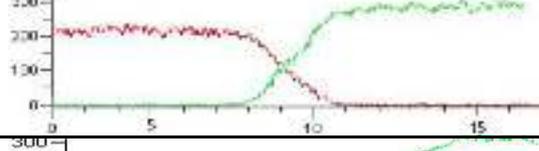
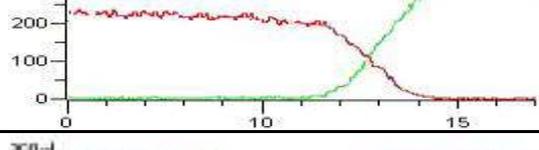
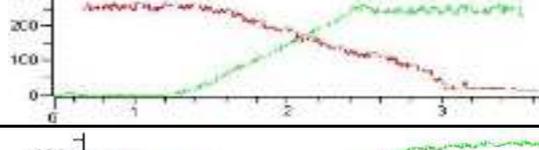
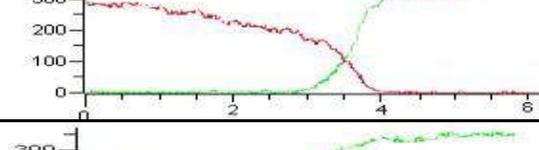
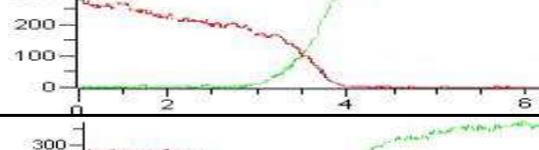
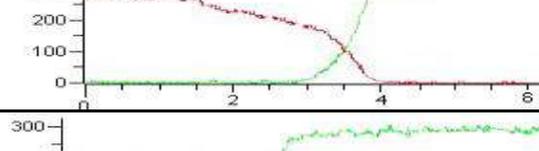
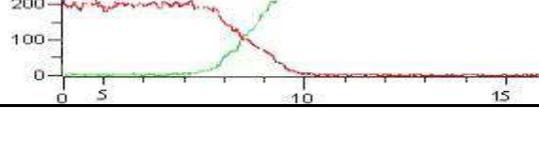
Таблица А.3 – Коэффициенты химического сродства электрокорунда белого с различными обрабатываемыми материалами при различных температурах

Марка	Темп-ра, °С	$x, 10^{-3}$, мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}, (10^{-7})$, мм ² /с
20	200	5,81		9,20
	400	7,31		14,57
	600	8,54		19,88
	800	9,13		22,72
	1000	9,56		24,91

Марка	Темп-ра, °C	x_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}), мм ² /с
30	200	5,21		7,40
	400	6,86		12,83
	600	8,13		18,02
	800	8,73		20,77
	1000	9,12		22,67
40	200	4,24		4,89
	400	6,26		10,68
	600	7,56		15,58
	800	8,02		17,54
	1000	8,33		18,91

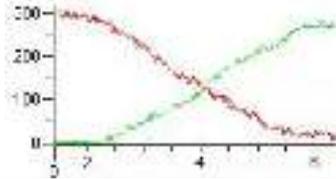
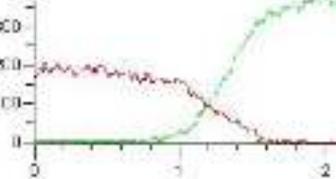
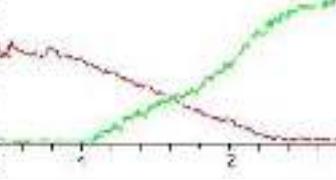
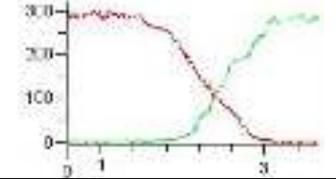
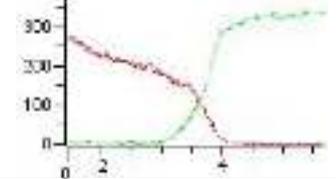
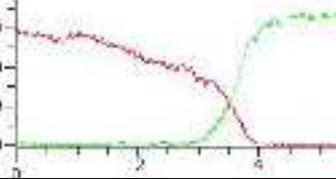
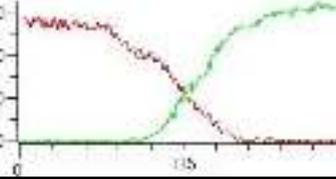
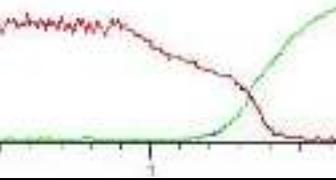
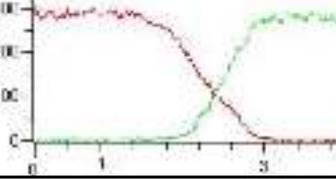
Марка	Темп-ра, °C	x_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}), мм ² /с
20X	200	2,54		1,76
	400	3,69		3,71
	600	5,51		8,28
	800	5,79		9,14
	1000	5,83		9,26
30X	200	2,05		1,15
	400	3,46		3,26
	600	4,67		5,94
	800	4,74		6,12
	1000	5,09		7,06

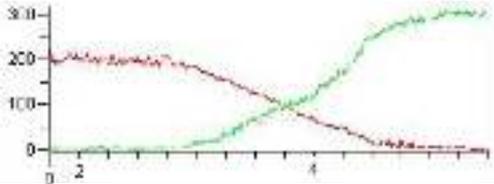
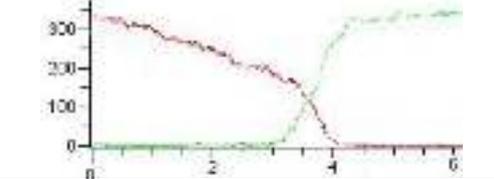
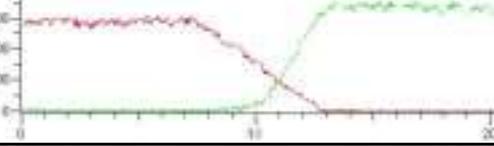
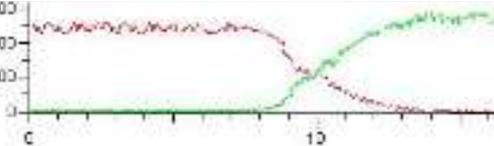
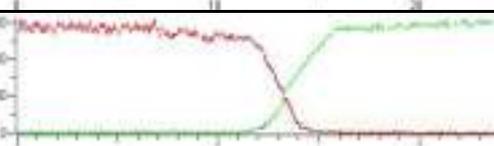
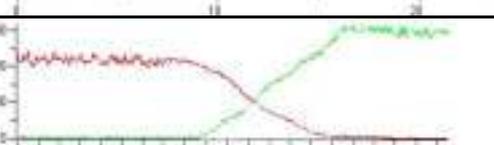
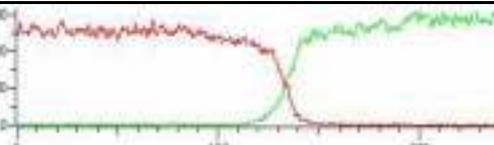
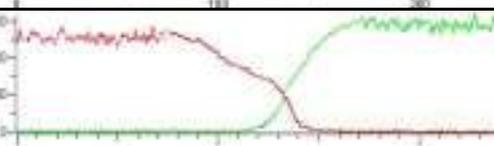
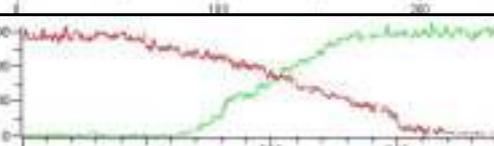
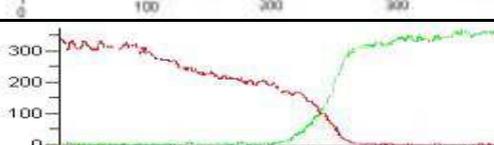
Марка	Темп-ра, °C	x_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}), мм ² /с
40X	200	1,12		0,34
	400	1,97		1,06
	600	2,99		2,43
	800	3,24		2,85
	1000	3,44		3,23
20X13	200	2,85		2,22
	400	4,61		5,80
	600	6,12		10,22
	800	6,98		13,30
	1000	7,20		14,12

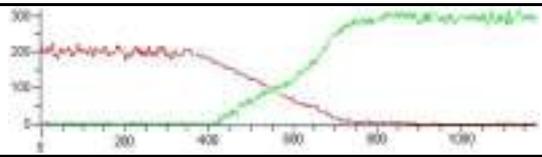
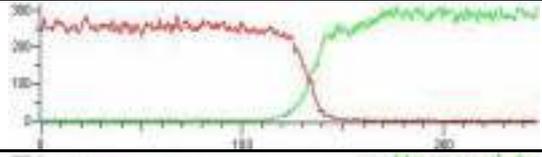
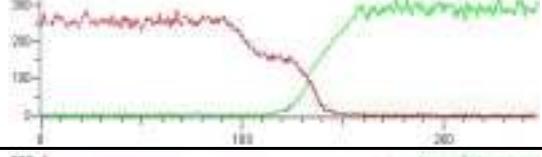
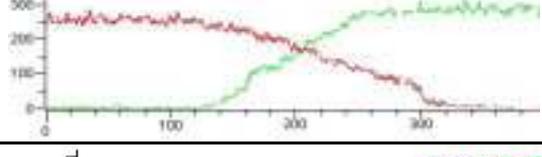
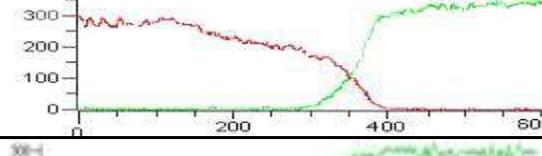
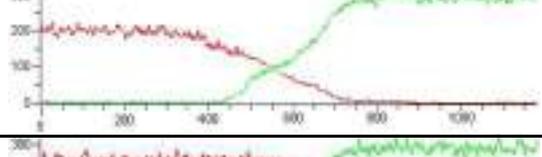
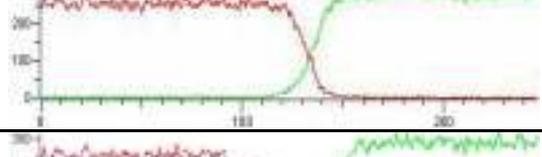
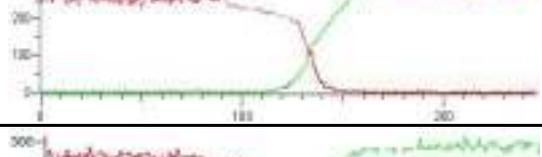
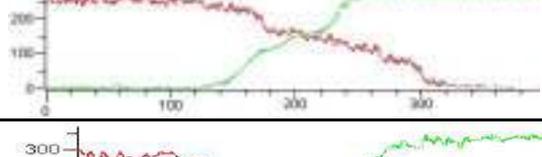
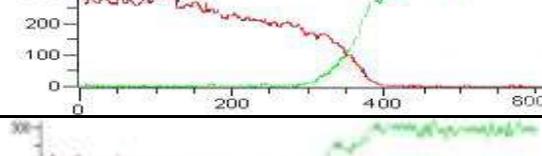
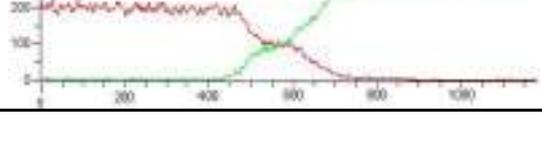
Марка	Темп-ра, °C	x_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}), мм ² /с
30X13	200	2,03		1,12
	400	4,19		4,79
	600	5,27		7,57
	800	5,64		8,67
	1000	5,91		9,52
40X13	200	1,89		0,97
	400	3,44		3,23
	600	3,66		3,65
	800	3,91		4,17
	1000	4,28		4,99

Марка	Темп-ра, °C	x_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
20XH	200	4,09		4,56
	400	5,11		7,12
	600	6,28		10,75
	800	6,91		13,01
	1000	7,03		13,47
30XH	200	2,36		1,52
	400	4,31		5,06
	600	5,96		9,68
	800	6,32		10,89
	1000	6,37		11,06

Марка	Темп-ра, °C	x_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
40XH	200	1,25		0,43
	400	2,87		2,24
	600	3,97		4,29
	800	4,46		5,41
	1000	4,96		6,71
20XH3A	200	1,24		0,42
	400	2,69		2,12
	600	3,46		3,26
	800	4,12		4,63

Марка	Темп-ра, °C	x_3 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
20ХН3А	1000	4,52		5,57
30ХН3А	200	0,88		0,21
	400	1,96		1,05
	600	2,66		1,93
	800	3,37		3,10
	1000	3,64		3,61
40ХН3А	200	0,53		0,08
	400	1,31		0,47
	600	2,49		1,69

Марка	Темп-ра, °C	χ_{2-3} , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
40ХН3А	800	2,96		2,39
	1000	3,17		2,74
38ХГН	200	7,85		16,80
	400	8,65		20,40
	600	11,00		32,97
	800	11,85		38,25
	1000	48,30		635,87
ВТ-3	200	145,90		(5,80)
	400	131,25		(4,70)
	600	251,46		(17,24)
	800	384,60		(40,32)

Марка	Темп-ра, °C	χ_2 , 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
	1000	496,57		(67,21)
BT-5	200	110,23		(3,91)
	400	130,20		(3,94)
	600	221,40		(13,36)
	800	375,69		(38,47)
	1000	475,60		(61,65)
BT-15	200	108,26		(3,19)
	400	118,40		(3,82)
	600	216,90		(12,82)
	800	369,80		(37,27)
	1000	469,50		(60,08)

Марка	Темп-ра, °C	$x_{2,3}$, 10^{-3} , мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
20Г	200	115,42		(3,63)
	400	116,33		(5,07)
	600	201,36		(11,05)
	800	334,56		(30,51)
	1000	445,69		(54,14)
40Г	200	84,59		(2,98)
	400	110,25		(3,31)
	600	181,40		(9,99)
	800	220,14		(18,45)
	1000	331,40		(33,66)

Продолжение таблицы А.3

Марка	Темп-ра, °C	$x_2 \cdot 10^{-3}$, мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}) мм ² /с
60Г	200	82,47		(1,85)
	400	105,60		(3,04)
	600	179,84		(7,86)
	800	218,46		(13,01)
	1000	312,58		(26,63)
38ХС	200	81,25		(1,8)
	400	100,25		(2,74)
	600	176,15		(8,46)
	800	214,63		(12,56)
	1000	291,10		(23,1)

Марка	Темп-ра, °C	$x_2 \cdot 10^{-3}$, мм	Данные микроскопии	$D_{cp} \cdot 10^{-10}$, (10^{-7}), мм ² /с
ОТ-3	200	116,37		(3,69)
	400	196,70		(10,55)
	600	201,90		(11,11)
	800	278,50		(21,14)
	1000	396,40		(42,83)
СЧ-20	200	86,00		(2,02)
	400	99,30		(2,69)
	600	165,40		(7,46)
	800	201,40		(11,06)
	1000	276,90		(20,90)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Аппаратное и методическое обеспечение
экспериментальных исследований эксплуатационных показателей
шлифовальных кругов**

1. Аппаратное обеспечение

Установка разработана на базе круглошлифовального станка с ЧПУ модели 3М151Ф2 [237, 221].

Основные технические характеристики станка 3М151Ф2

Диаметр ШК D_k , мм	
наибольший	600
наименьший	450
Высота ШК B , мм	63...80
Частота вращения ШК n_k , об/мин	1590
Скорость резания V_k , м/с	50
Диаметр шлифуемого изделия d_z , мм	20...200
Пределы скоростей радиальных подач, мм/мин	0,01...3,0
Мощность привода главного движения, кВт	7,5

Фотография станда представлена на рисунке Б.1.

Установка оснащена измерительно-регистрирующими контурами, которые позволяют осуществлять измерение величин эксплуатационных показателей ШК в любой момент времени.



Рисунок Б.1 – Общий вид испытательной установки

1.1. Контур для измерения составляющих силы шлифования

Для контроля величины составляющих силы шлифования применялись контактные индуктивные датчики системы БВ-6134.

Общая характеристика системы БВ-6134:

Ход измерительного наконечника преобразователя, мм	$\pm 0,5$
Цена деления шкалы, мм	0,001 и 0,005
Погрешность показаний системы от нулевого штриха, мм	
на участке ± 10 делений	0,0005
на всей шкале	0,0025

Индуктивные преобразователи монтируются в специальный кронштейн с лысками, установленный на столе станка. В квадратное отверстие кронштейна 1 помещается центр 2 задней бабки станка, на котором также выполнены лыски (рисунок Б.2, Б.3). Индуктивные датчики упираются контактными элементами в лыски центра и измеряют величину перемещения заднего центра в направлении действия радиальной и нормальной составляющей силы шлифования. Одновременное измерение перемещения двумя датчиками, расположенными на одной оси и направленными в противоположные стороны обеспечивает двукратное усиление сигнала.

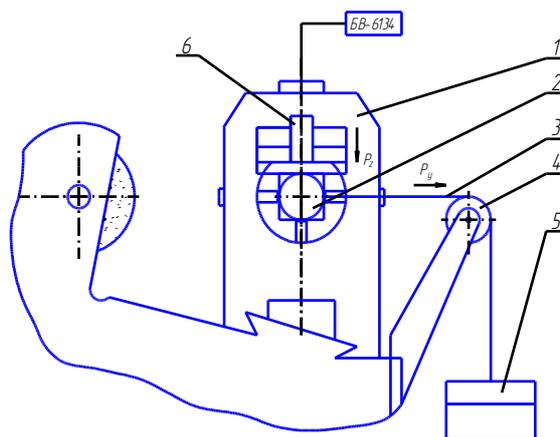


Рисунок Б.2 – Общий вид установки датчиков для измерения составляющих силы резания
 Рисунок Б.3 – Схема устройства для тарировки датчиков

Датчики предварительно необходимо подвергнуть тарировке, для чего кронштейн 1 (рисунок Б.3) закрепляется на столе станка. В центрах станка устанавливается специальная оправка с тросиком 3 через блок 4. На диск 5, который расположен на другом конце тросика, накладываются мерные грузы. Фиксируется величина силы, действующей со стороны груза на центр и величина смещения центра в направлении действия силы.

Тарировка датчика, установленного для фиксации величины составляющей силы резания P_z , производится установкой грузов на стержень 6.

Тарировочные графики показаны на рисунке Б.4, по которым определяются величины составляющих силы шлифования.

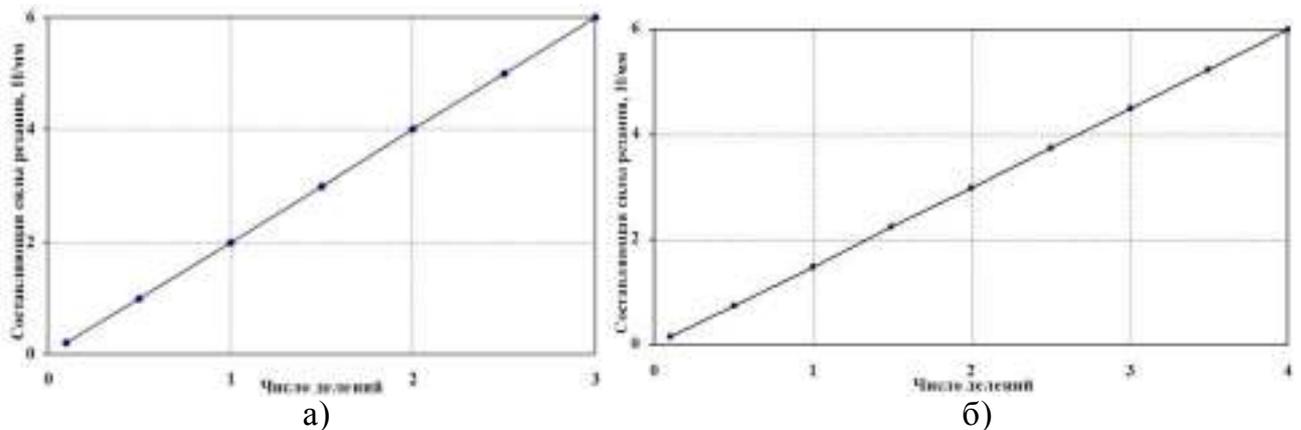


Рисунок Б.4 – Тарировочные графики составляющих силы шлифования: а) P_y б) P_z

1.2. Контур измерения шероховатости шлифованной поверхности

Контур включает в себя измерительную систему Абрис–ПМ 7 (рисунок Б.5), в основе которой профилометр.

Общая характеристика профилометра «Абрис ПМ.7»:

Измеряемые параметры шероховатости	R_a , R_z , R_{max}
Вид результатов измерения	Цифровой
Трасса ощупывания, мм	0,25; 0,8; 2,5
Радиус при вершине измерительного наконечника, мм	0,005
Метод измерения	Непосредственной оценки



а)



б)

Рисунок Б.5 – Измерительная система «Абрис ПМ7»
а) профилометр; б) общий вид измерительной системы

1.3. Другие приборы и принадлежности

В процессе проведения стендовых испытаний применялся:

- секундомер с ценой деления 1 с – для определения длительности периода работы ШК;
- микрометр МК75–1 ГОСТ 6507–90 – для контроля диаметра обрабатываемой заготовки до и после шлифования;
- штангенциркуль ШЦ–II–250–0,05 ГОСТ 166 – для выполнения различных вспомогательных измерений;
- набор концевых мер длины КМД ГОСТ 9038-90 – для регулировки и настройки измерительных инструментов и пр.

2. Методическое обеспечение

2.1 Условия испытаний

Схема шлифования и образец. Для испытаний ШК была принята схема шлифования с одним параметром управления (врезная подача шлифовального круга) – круглое врезное шлифование в центрах.

Чертеж образца представлен на рисунке Б.6, фотография — на рисунке Б.7. На рисунке Б.7 также показана оправка для установки образца.

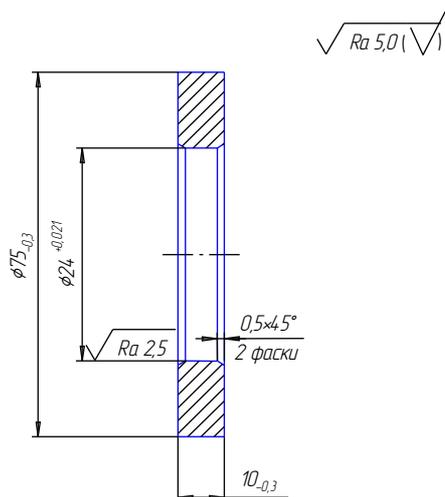


Рисунок Б.6 – Чертеж образца



Рисунок Б.7 – Фото образцов и оправки

Режимы шлифования. В таблице Б.1 приведен фрагмент таблицы из нормативов шлифования.

Таблица Б.1 – Нормативные рекомендации для условий круглого врезного шлифования в центрах [258] (фрагмент)

Припуск, мм	Скорость радиальной подачи круга, мм/мин
0,15	0,43
0,30	0,56
0,50	0,70
0,70	0,88
1,0	1,13

Поскольку шлифование – процесс цикловый, то необходимо учитывать, что приведенные выше режимы шлифования являются средними.

Учитывая данные таблицы Б.2, в которой приведены подачи для работ, выполняемых на станках с ЧПУ для испытаний принимаем ряд подач меньше величины подачи, рекомендуемой для черновой стадии шлифования и больший, чем подача, рекомендуемая для чистового шлифования.

Таблица Б.2 – Рекомендации для условий круглого врезного шлифования на станках с ЧПУ (фрагмент таблицы)

Припуск, мм	Номер ступени подачи			
	1		2	
	Припуск, мм	Скорость радиальной подачи круга, мм/мин	Припуск, мм	Скорость радиальной подачи круга, мм/мин
0,3	0,260	1,2	0,040	0,07
0,5	0,467	1,2	0,033	0,03
0,7	0,662	1,2	0,038	0,07
1,0	0,966	1,2	0,034	0,03

Экспериментальное исследование эксплуатационных показателей ШК необходимо выполнять для подач, соответствующих проектируемой операции.

Испытываемые шлифовальные круги.

Стенд позволяет выполнять испытания ШК 1 600(500)×63(40)×305, с рабочей скоростью 50 м/с, ГОСТ 52781-2007 различных характеристик.

Порядок проведения испытания.

1. Перед началом работы с новым ШК произвести динамическую балансировку круга с помощью устройства для автоматической балансировки.
2. Измерить диаметр обрабатываемого образца, закрепить его на оправку и установить оправку в центрах станка.
3. Установить требуемую частоту вращения заготовки [258]. Задать требуемую величину скорости радиальной подачи круга. Значения скоростей подач – $v_{\text{Срад}}$ (мм/мин) при испытаниях ШК принимают в соответствии с проектируемой операцией.
4. Включить подачу СОЖ. Начать шлифование. Одновременно с началом процесса резания включить секундомер. Через 30 с после начала обработки зафиксировать величины составляющих силы шлифования, выполнить отвод ШК от обрабатываемой заготовки путем переключения направления движения шлифовальной бабки.
5. Снять образец со станка и произвести замеры, необходимые для получения величин эксплуатационных показателей:

- измерить шероховатость шлифованной поверхности R_a в шести различных сечениях образца (в соответствии с приведенной ниже методикой).
 - измерить диаметр заготовки.
6. Этот же образец снова установить на станок и продолжить обработку на тех же режимах резания. Повторить с п. 4.
 7. При возникновении характерного звука и появлении дробления на обрабатываемой поверхности (огранка 0,5 мм) прекратить шлифование. На малых режимах удалить огранку с образца. Заправить круг на соответствующих режимах.
 8. Изменить скорость радиальной подачи круга. Выполнить п.п. 4–7.
 9. Полученные данные заносить в протокол испытаний (таблица Б.3).

Таблица Б.3 – Протокол испытаний

№	Дата	Круг										
		Время работы круга, мин	Показатель									
			R_y			R_z			R_a			
			Повтор									
			1	2	...	1	2	...	1	2	...	

2.2. Методика измерения средних величин составляющих силы шлифования

Измерение составляющих силы резания при шлифовании основано на сопоставлении величины отжима заднего центра с величиной составляющей силы шлифования, действующей со стороны шпиндельного узла станка.

Для измерения составляющих силы шлифования через каждые 30 с испытаний фиксируются показания стрелки с отсчетной шкалы приборов БВ–6134 — величины составляющих сил R_y и R_z . Измерения заносятся в протокол испытаний.

После окончания испытаний при помощи тарировочного графика определяется величина составляющей силы резания и заносится в протокол испытаний.

2.3. Методика измерения шероховатости шлифованной поверхности

Измерение шероховатости шлифованной поверхности производится при помощи профилометра на специальной стойке через каждые 30 с шлифования.

Для измерения деталь устанавливается в призму. Первичный преобразователь закрепляется в специальной обойме и включается прибор. Далее измерительная игла вводится в контакт с контролируемой поверхностью.

Переключатель измеряемого параметра устанавливается в требуемое положение, устанавливается отсечка шага (базовая длина), после чего нажимается кнопка «Пуск». После окончания движения иглы и отображения результата замера полученная величина заносится в протокол испытаний. Затем измерительный наконечник отводится от контролируемой поверхности, после чего деталь поворачивается на угол $\sim 60^\circ$ и замер повторяется. Замер шероховатости проводится еще в 5 сечениях. Результаты замеров фиксируются в протоколе испытаний.

2.5. Методика статистической обработки результатов испытания круга

1. Определяется среднее значение измеряемой величины по результатам нескольких опытов [81]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{Б.1})$$

2. Вычисляется погрешность отдельного измерения [81]:

$$\Delta y_i = |\bar{y} - y_i| \quad (\text{Б.2})$$

3. В качестве несмещенной оценки генеральной дисперсии определяется выборочная дисперсия [81]:

$$S_{y_i}^2[n-1] = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta y_i^2}{n-1} \quad (\text{Б.3})$$

4. Однородность выборочных дисперсий проверяется по критерию Кохрена [48]:

$$\frac{\max S_{y_i}^2[n-1]}{\sum_{i=1}^k S_{y_i}^2[n-1]} < g[n-1, k] \quad (\text{Б.4})$$

В случае выполнения неравенства (Б.4), все дисперсии S_{y_i} являются оценками одной генеральной дисперсии.

5. Вычисляется объединенная дисперсия [81]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (n-1) \cdot S_{y_i}^2}{\sum_{i=1}^k (n-1)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{y_i}^2 [n-1] \quad (\text{Б.5})$$

6. Определяется число степеней свободы объединенной дисперсии:

$$v = (n-1) \cdot k, \quad (\text{Б.6})$$

где n — число повторов в каждом опыте; k — общее количество опытов.

7. По средним величинам строятся тренды эксплуатационных показателей (эмпирические кривые).

8. Строится матрица планирования (x_1 — const (равна 1); x_2 — временная дискрета, y — эксплуатационный показатель) [98]:

i	x_1	x_2	y
1	1	0,5	y_1
2	1	1,0	y_2
...
k	1	...	y_k

9. Выбирается вид уравнения регрессии.

10. Матричное уравнение для коэффициентов уравнения регрессии $\{b_i\}_m$, где m — количество коэффициентов

$$\hat{N} \cdot \bar{B} = \bar{Q}, \quad (\text{Б.7})$$

в котором

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}, \quad \bar{Q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_m \end{pmatrix}, \quad \hat{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1z} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{z1} & h_{z2} & \dots & h_{zm} \end{pmatrix} \quad (\text{Б.8})$$

$$q_i = \sum_{k=1}^k y_k \cdot x_{ik}, \quad h_{ij} = \sum_{k=1}^k x_{ik} \cdot x_{jk} \quad (\text{Б.9})$$

решается относительно \bar{B} :

$$\bar{B} = \frac{1}{\det|h_{ij}|} \cdot \hat{H}^{-1} \cdot \bar{Q}, \quad (\text{Б.10})$$

где \hat{H}^{-1} — транспонированная матрица \hat{H} .

11. Полученные в результате коэффициенты матрицы \bar{B} являются коэффициентами в принятом уравнении.

12. Определяется дисперсия адекватности [98]:

$$S_{\text{ад}}^2[k-m] = \frac{1}{k-m} \sum_{i=1}^k (y_i - y_{\text{ирасч}})^2 \quad (\text{Б.11})$$

13. Выполняется оценка адекватности уравнения регрессии [98]:

$$\frac{S_{\text{ад}}^2[k-m]}{S_y^2[v]} < F_{1-\alpha}[k-m; v], \quad (\text{Б.12})$$

где $S_y^2[v]$ — объединенная дисперсия; $F_{1-\alpha}[k-m; v]$ — критерий Фишера [81].

Выполнение неравенства (Б.12) говорит об адекватности полученного уравнения регрессии. В случае невыполнения неравенства (Б.12) принятое уравнение регрессии отвергается и рассматривается функциональная зависимость более высокого порядка.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Аппаратное и методическое обеспечение
экспериментальных исследований процесса шлифования
методом микрорезания**

1. Аппаратное обеспечение

Установка, применяемая для исследования процесса микрорезания, приведена на рисунке В.1 [222, 223].

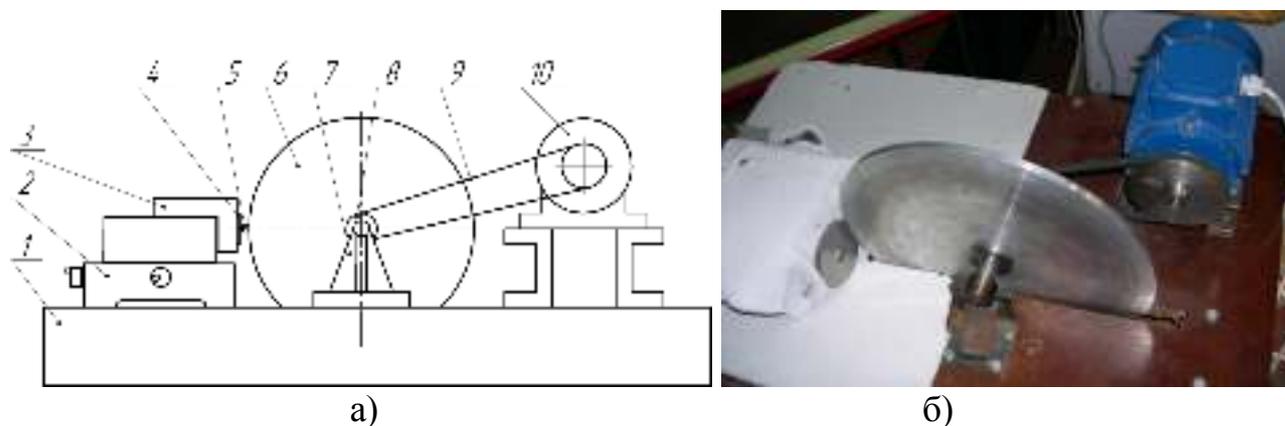


Рисунок В.1 – Стенд микрорезания: а) схема; б) общий вид

На станине 1 установлен столик 2, с подвижными крестовыми салазками, на которых установлен держатель 3 для закрепления образца 4. С образцом взаимодействует единичное абразивное зерно 5, установленное в диск 6, имитирующий шлифовальный круг. Диск закреплен на валу, в подшипниках, установленных в кронштейны 7. Требуемая скорость вращения диска обеспечивается сменными шкивами 8 при помощи ременной передачи 9 от электродвигателя 10.

Единичное зерно закрепляется в оправке и устанавливается в диск 6; обрабатываются образцы (рисунок В.2).



Рисунок В.2 – Исходные материалы: а) формокорунд; б) единичное зерно в оправке; в) образец

Для заточки единичных абразивных зерен применялось специальное приспособление – поворотная головка (рисунок В.3, а), для нагрева образца – бытовая газовая горелка. Контроль температуры образца осуществлялся портативным бесконтактным пирометром ПП-1, показанным на рисунке В.3, б. Для осуществления контроля температуры образца необходимо настроить прибор кнопками 2–5 в со-

ответствии с инструкцией, затем луч лазерного указателя 8 навести на контролируемую поверхность. На дисплее 1 отобразится температура поверхности образца. Также существует возможность подключения к прибору термопары через порт 9, а также персонального компьютера через СОМ-порт 10. Для анализа полученных на образце абразивных царапин применяется метод фотометрии с использованием оптического микроскопа МБС-9. Общий вид приборов, применяемых в экспериментах, показан на рисунке В.3. Также на рисунке показан образец после испытаний с образованными на его поверхности абразивными царапинами.

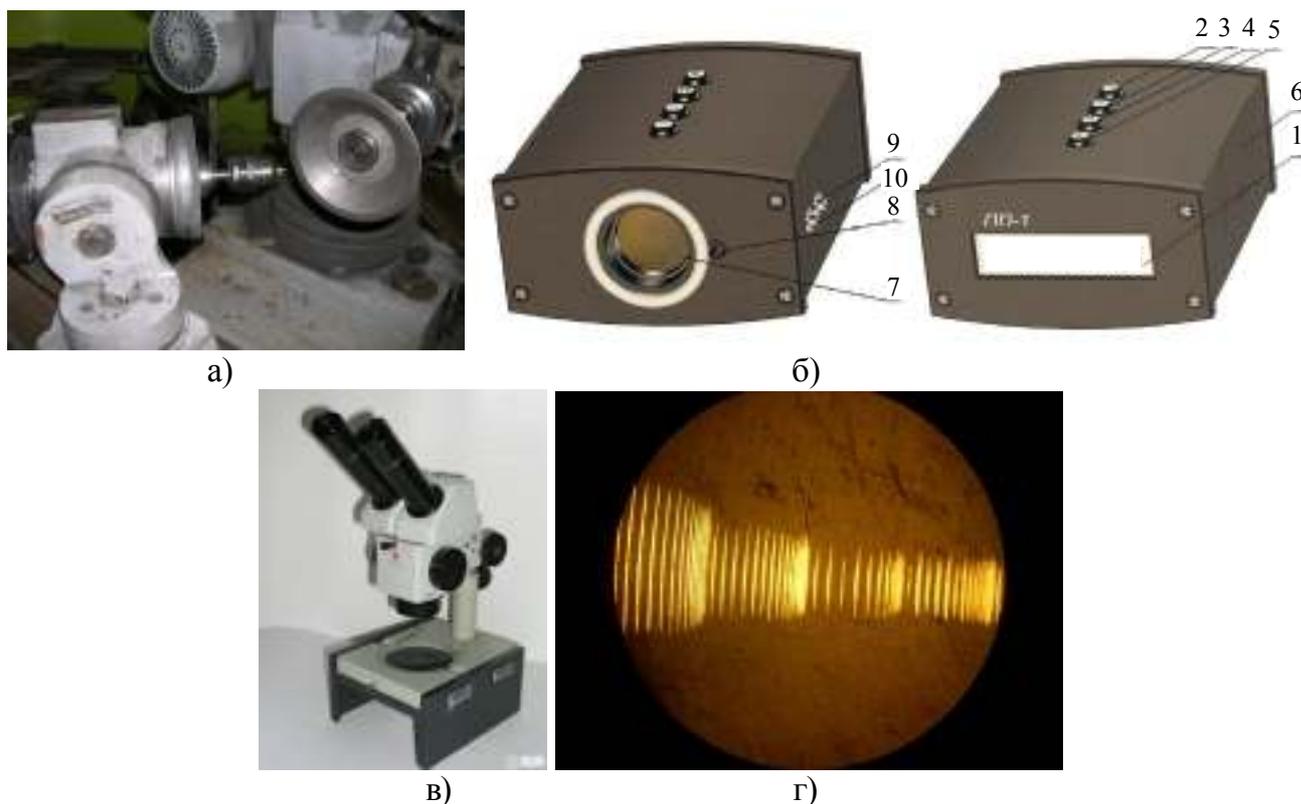


Рисунок В.3 – Общий вид приборов, используемых в эксперименте:
 а) поворотная головка для заточки единичных абразивных зерен;
 б) пирометр ПП-1; в) микроскоп МБС-9; г) образец после царапания

Дополнительно в экспериментах использовались: цифровая фотокамера, персональный компьютер и эталонная мера длины «1 мм» ЛОМО.

2. Методическое обеспечение

1. Установить образец зерна в держатель, закрепить его в державке и в диске. Ввести зерно в контакт с обрабатываемым образцом.

2. При помощи микрометрических винтов, имеющихся на столике, настроить глубину врезания единичного зерна (0,01...0,005 мм).

3. Отвести образец в сторону.
4. Настроить пирометр на измерение температуры поверхности образца.
5. Начать нагрев образца горелкой.
6. При достижении температуры требуемого значения включить вращение диска и продолжить нагрев, т.к. циркуляция воздуха, возникшая в результате вращения диска, охлаждает образец.
7. При достижении требуемой температуры вращением маховика продольной подачи столика осуществить взаимодействие абразивного зерна с образцом.
8. Выключить вращение диска, снять образец.
9. Выполнить фотометрический анализ образца с нанесенными царапинами при помощи микроскопа, цифровой фотокамеры и персонального компьютера.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Внедрение результатов работы

УРАЛЬСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АБРАЗИВОВ И ШЛИФОВАНИЯ

**РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ НА РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ
НА ШЛИФОВАЛЬНЫХ И ДОВОДОЧНЫХ СТАНКАХ
С РУЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ПОЛУАВТОМАТАХ**

СПРАВОЧНИК

Челябинск 2007

УДК 621.9(08)+621.92(08)+621.922(08)+621.923(08)

ББК Р339

ISBN 5-8227-0114-0

Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах. Справочник. — Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2007. — 384 с.

В справочнике приведены карты по выбору характеристики абразивного инструмента, назначению режимов обработки и расчета основного времени на работы, выполняемые на круглошлифовальных, плоскошлифовальных, бесцентрово-шлифовальных, торцекруглошлифовальных, внутришлифовальных, резьбошлифовальных, шлицешлифовальных, зубошлифовальных, профилешлифовальных, хонинговальных, суперфинишных, притирочных, абразивно-отрезных, ленточно-шлифовальных станках. Кроме того, даются рекомендации по выбору правящего инструмента и режимов правки шлифовального круга.

Справочник предназначен для нормировщиков, технологов, и других инженерно-технических работников, занятых проектированием операций, выполняемых на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах в механических цехах машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий в условиях всех типов производства.

По вопросам приобретения справочника следует обращаться в Уральский НИИ абразивов и шлифования по адресу:

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, дом 81.

Контактные телефоны (351) 265-56-46, 239-92-07.

E-mail: normativ_abraziv@mail.ru.

Факс: (351) 265-56-46.

Авторы:

Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин, А.А. Дьяконов, А.В. Жученко, В.М. Исаков, В.Д. Кандакова, Е.С. Киселев, О.В. Комкин, С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.П. Курносков, Д.В. Прыгунов, Ю.Н. Свиридов, Н.А. Софинский, Т.В. Столярова, Н.В. Сырейщикова, С.А. Фадюшин, Л.А. Филиппова, Л.В. Худобин, Б.А. Чаплыгин, Ю.Р. Щитупнова.

Перепечатка, создание электронных версий
и другие виды тиражирования и использования запрещены.

© Уральский НИИ абразивов и шлифования, 2007.

© Издательство АТОКСО, 2007.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
Уральский научно-исследовательский институт
абразивов и шлифования

**АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА:
НАЛАДКА, РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ**

Справочник

Челябинск 2012

УДК 621.9(08)+621.92(08)+621.922(08)+621.923(08)
 ББК Р339
 ISBN 5-8227-0114-0

Абразивная обработка: наладка, режимы резания. 2-е изд., перераб. и доп. Справочник / под общей ред. А.А. Дьяконова — Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2012. — 388 с.

В справочнике приведены карты по выбору характеристики абразивного инструмента, назначению режимов обработки и расчета основного времени на работы, выполняемые на круглошлифовальных, плоскошлифовальных, бесцентрово-шлифовальных, торцекруглошлифовальных, внутришлифовальных, резьбошлифовальных, шлицшлифовальных, зубошлифовальных, профилешлифовальных, хонинговальных, суперфинишных, притирочных, абразивно-отрезных, ленточно-шлифовальных станках. Кроме того, даются рекомендации по выбору правящего инструмента и режимов правки шлифовального круга.

Справочник предназначен для нормировщиков, технологов, и других инженерно-технических работников, занятых проектированием операций, выполняемых на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах в механических цехах машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий в условиях всех типов производства.

Авторы:

Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин, А.А. Дьяконов, А.В. Жученко, В.М. Исаков, В.Д. Кандакова, Е.С. Киселев, О.В. Комкин, С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.П. Курносков, Д.В. Прыгунов, Ю.Н. Свиридов, Н.А. Софинский, Т.В. Столярова, Н.В. Сырейщикова, С.А. Фадюшин, Л.А. Филиппова, Л.В. Худобин, Б.А. Чаплыгин, Ю.Р. Щипунова.

Перепечатка, создание электронных версий
 и другие виды тиражирования и использования запрещены.

© ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), 2012.

© Уральский НИИ абразивов и шлифования, 2012.

© Издательство АТОКСО, 2012.



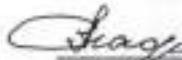
ООО Торговый дом «Абразивные заводы Урала»

ОАО «Уральский НИИ абразивов и шлифования»

СТАНДАРТ ПРЕДПРИЯТИЯ

СОГЛАСОВАНО:

Генеральный директор ОАО «ЧАЗ»


«08» 2004 г.



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ОАО «УралНИИАШ»


2004 г.



Генеральный директор ОАО «Росси»

Н.М. Кузенков

«8» 2004 г.



**КРУГИ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
СТП 774-04-2004**

Челябинск, 2004



ООО Торговый дом «Абразивные заводы Урала»

ОАО «Уральский НИИ абразивов и шлифования»

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ОАО «УралНИИАШ»



Б.А. Чаплыгин

2004 г

КРУГИ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ
МЕТОДИКА РАБОТЫ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ПАСПОРТОМ

Челябинск, 2004



ОАО «Уральский НИИ абразивов и шлифования»

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ОАО «УралНИИАШ»

Б.А. Чаплыгин

« 20 _ г.

КРУГИ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ
ПРИ ОБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫХ МАРК СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Челябинск, 2012



УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления главного технолога
ООО «ЧТЗ-УралТРАК»

А.Ю. Сухарев

«30» января 2018 г.

г. Челябинск

29 января 2018 г.

**Акт внедрения
научно-исследовательской работы
«Режимно-инструментальное обеспечение операций абразивной обработки
на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов»**

Комиссия в составе представителя ООО «ЧТЗ-УралТРАК» – начальника бюро А.В. Ивановой и представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на ООО «ЧТЗ-УралТРАК» (г. Челябинск) внедрен и успешно используется РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов при обработке различных марок сталей и сплавов».

Для реализации операций круглого врезного шлифования деталей трех разных наименований, изготовленных из различных материалов, рекомендованы шлифовальные круги характеристик:

- 92AF46O7V, 0,5 мм/мин – для обработки детали «Вал» (сталь 45);
- 24AF54L7V, 0,2 мм/мин – для обработки детали «Втулка» (сталь 40ХНМА);
- 24AF60M7V, 0,3 мм/мин – для обработки детали «Кольцо» (сталь 14ХГН).

Указанные характеристики кругов и режимы шлифования подобраны в соответствии с применяемыми на предприятии рекомендациями. Суммарное время изготовления всех партий деталей при этом составило 695 мин.

Для оптимизации указанных операций шлифования было выполнено прогнозирование работоспособности ШК указанных характеристик. В дальнейшем, с применением методики континуального проектирования был сформирован рациональный порядок замены ШК на станке, а также выбран режим шлифования каждой партии деталей:

- 92AF46O7V, 0,5 мм/мин – для обработки детали «Вал» (сталь 45) и 0,35 мм/мин – для обработки детали «Втулка» (сталь 40ХНМА);
- 24AF60M7V, 0,6 мм/мин – для обработки детали «Кольцо» (сталь 14ХГН).

В результате внедрения научно-исследовательской работы – применения методики прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов, а также реализации методики континуального проектирования операций шлифования, суммарное время обработки партий всех деталей составило 412,3 мин, т.е. сократилось в 1,7 раза за счет формирования рационального порядка замены инструментов на станке и определения режима шлифования максимальной производительности для обработки каждой партии заготовок.

Кроме того установлено, что обработка указанных партий заготовок может осуществляться кругами двух характеристик, что приводит к сокращению номенклатуры применяемых шлифовальных кругов в 1,5 раза.

Экономический эффект от внедрения научно-исследовательской работы составил 171 810 (сто семьдесят одна тысяча восемьсот десять) руб.

От ООО «ЧТЗ-УралТРАК»
Начальник бюро



А.В. Иванова

От ЮУрГУ:
Доцент, канд. техн. наук



Д.В. Ардашев



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
УРАЛЬСКИЙ ЗАВОД ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ
Пл. Первой пятилетки, г. Екатеринбург, 620012
Тел.: 343 336 65 81 Факс: 343 336 60 40
mail@uralmash.ru www.uralmash.ru
ОКПО 00210571 / ОГРН 1026605620689 / ИНН 6663005798 / КПП 660601001



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ПАО «Уралмашзавод»
А.Л. Кузнецов
2017 г.
Екатеринбург 16 июня 2017 г.

АКТ АПРОБАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ
научно-исследовательской работы

«Повышение эффективности операций шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов».

Комиссия в составе:

- представителя ПАО «Уралмашзавод» - главного инженера - В.В. Янкового
- представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева,
составила настоящий акт в том, что ПАО «УРАЛМАШ» (г. Екатеринбург) внедрил и успешно использует методику проектирования операций шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов.

В соответствии с указанной методикой было выполнено проектирование операций шлифования для обработки следующих деталей:

- ролик (сталь 35, Ra 0,8 мкм, IT6);
- вал моторный левый (сталь 40X, Ra 1,6 мкм, IT 7);
- вал моторный правый (сталь 40X, Ra 2,0 мкм, IT6).

В результате, суммарное время шлифования деталей составило:

- ролик – 3,15 мин;
- вал моторный левый – 4,6 мин;
- вал моторный правый – 4,6 мин.

что в 1,2...1,5 раза меньше по сравнению с данными технологических процессов, применяющихся на предприятии.

В сравнении с существующими рекомендациями по проектированию операций шлифования, применяемыми на предприятии (Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках / Часть 3: Протяжные, шлифовальные и доводочные станки / Издание 3-е. – М.: Изд-во ЦБНТ при НИИ Труда, 1978. – 360 с.) на предприятии произошло сокращение количества применяемых шлифовальных кругов, необходимых для обработки указанных деталей в 2 раза.

Опробованная в условиях предприятия методика проектирования операций шлифования рекомендована к постоянному применению. Прогнозируемый экономический эффект от внедрения научно-исследовательской работы составит 480 650 руб.

Главный инженер
ПАО «Уралмашзавод»
Янковой В. В.

Доцент, канд. техн. наук
ЮУрГУ
Д.В. Ардашев



Уральский Механический Завод

ООО "УМЗ" ИНН 44020466, ОГРН 1087448011002, КПП 440201001 454004, г. Челябинск, ул. Азаткина-Егорова, 48, пом. 3
 ВПО: 041300902, Организация № 9147 Челябинск, Россия
 к/с 30101810700000000602, р/с 40702810272000006190
 тел-факс: (351) 283-00-10, (351) 283-00-11, (351)283-00-12, (351)283-00-13, (351)283-00-14 E-mail: info@umz.ru

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 ООО «Уральский механический завод»
 В.В. Киселев
 2017 г.
 г. Челябинск 21 июля 2017 г.

АКТ АПРОБАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ научно-исследовательской работы

«Проектирование операций шлифования с учетом работоспособности шлифовальных кругов»

Комиссия в составе представителя ООО «Уральский механический завод» главного инженера Буслаева В.П., представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на ООО «Уральский механический завод» (г. Челябинск) внедрена и используется методика проектирования операций шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов.

В соответствии с указанной методикой было выполнено проектирование операций шлифования для обработки следующих деталей:

- ролик (сталь 45, Ra 1,6 мкм, IT7),
- ось (сталь 38ХС, Ra 1,6 мкм, IT 7),
- шток (сталь 40ХН, Ra 0,8 мкм, IT6).

В результате, суммарное время шлифования деталей составило:

- ролик – 1,06 мин;
- ось – 2,15 мин;
- шток – 5,2 мин.

что в 1,1...1,5 раза меньше по сравнению с данными технологических процессов, применяющихся на предприятии.

В сравнении с существующими рекомендациями по проектированию операций шлифования, применяемыми на предприятии (*Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках / Часть 3. Протяжные, шлифовальные и дрводочные станки / Издание 3-е. – М.: Изд-во ЦБНТ при НИИ Труда, 1978. – 360 с.*) произошло сокращение количества применяемых шлифовальных кругов, необходимых для обработки указанных деталей в 2 раза. Опробованная в условиях предприятия методика проектирования операций шлифования рекомендована к постоянному применению. Прогнозируемый экономический эффект от внедрения научно-исследовательской работы составит 245 352 руб.

От ООО «Уральский механический завод»: Главный инженер В.П. Буслаев В.П. Буслаев В.П.

От ЮУрГУ: Доцент, канд. техн. наук Д.В. Ардашев Д.В. Ардашев



Система менеджмента качества соответствует: ГОСТ ИСО 9001:2011, ГОСТ РВ 0015-002-2012
 Сертификат соответствия № ВР 10.1.10051-2016
 Выдан в системе добровольной сертификации «Военный регистр»

УТВЕРЖДАЮ

Начальник техбюро ЦПГ
ПАО «Агрегат»

А.К. Коряковцев

« 21 »

2016 г.

г. Сим

21 декабря 2016 г.

**Акт апробации и внедрения
научно-исследовательской работы
«Методика непрерывного проектирования операций шлифования»**

Комиссия в составе представителя ПАО «Агрегат» – инженера-технолога цеха промышленной гидравлики В.З. Ильясова и представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на ПАО «Агрегат» (г. Сим) опробован и успешно используется РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов», а также РТМ «Методика работы с технологическим эксплуатационным паспортом».

Применение указанных нормативно-технических документов позволило сократить номенклатуру применяемых на предприятии шлифовальных кругов на 15%, а также повысить производительность процессов шлифования на 10%. Это было достигнуто за счет более эффективного использования ресурса работоспособности абразивного инструмента, эксплуатирующегося в различных технологических условиях.

Экономический эффект внедрения научно-исследовательской работы составил 85 000 рублей.

От ПАО «Агрегат»

Инженер-технолог ЦПГ

В.З. Ильясов

От ЮУрГУ:

Доцент, канд. техн. наук

Д.В. Ардашев

УТВЕРЖДАЮ



Технический директор
АО «Кыштымское машиностроительное
объединение»

А.В. Морозов

2016 г.

г. Кыштым

23 ноября 2016 г.

Акт апробации и внедрения
научно-исследовательской работы
«Проектирование операций шлифования
с учетом эксплуатационных свойств шлифовальных кругов»

Комиссия в составе представителя АО «КМО» – главного технолога А.С. Мелентьева и представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на АО «КМО» (г. Кыштым) внедрен и успешно используется РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов», а также РТМ «Методика работы с технологическим эксплуатационным паспортом».

В результате использования руководящих технических материалов технологическими службами предприятия номенклатура применяемого абразивного инструмента сократилась на 20 %, а эффективность операций абразивной обработки увеличилась на 15 % (за счет сокращения времени простоя технологического оборудования для замены инструмента). Кроме этого, произошло сокращение расхода абразивного инструмента на 10 % за счет более рационального использования ресурса его работоспособности, а также обоснованного выбора критериев необходимости правки инструмента.

Экономический эффект от внедрения научно-исследовательской работы составил 134 500 рублей.

От АО «Кыштымское
машиностроительное объединение»

Главный технолог

А.С. Мелентьев

От ЮУрГУ:

Доцент, канд. техн. наук

Д.В. Ардашев



УРАЛЬСКИЙ ЗАВОД СПЕЦТЕХНИКИ

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «Уральский завод спецтехники»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Уральский завод спецтехники»



А.Л. Корчинский

2017 г.

г. Миасс

13 февраля 2017 г.

АКТ АПРОБАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ

научно-исследовательской работы

«Проектирование операций шлифования на основе
технологических эксплуатационных паспортов шлифовальных кругов»

Комиссия в составе представителя ООО «Уральский завод спецтехники» – главного инженера Е.А. Смолянинова и представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на ООО «Уральский завод спецтехники» (г. Миасс) внедрен и успешно используется РТМ «Круги шлифовальные. Прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов», а также РТМ «Круги шлифовальные. Методика работы с технологическим эксплуатационным паспортом».

Указанные нормативно-технические материалы применялись при проектировании технологических процессов обработки деталей, планируемых к изготовлению в условиях предприятия:

- вал привода топливного насоса (сталь 35, Ra 0,8 мкм, IT6);
- ось стрелы манипулятора (сталь 40X, Ra 1.6 мкм, IT 7);
- вал привода барабана лебедки (сталь 40X, Ra 0,8 мкм, IT6).

Использование указанных нормативно-технических материалов позволило обоснованно подобрать характеристику шлифовального круга и режимы шлифования, позволивших осуществить обработку всех деталей с обеспечением требований чертежа и максимальным уровнем производительности процесса.

В сравнении с существующими рекомендациями по проектированию операций шлифования, применяемыми на предприятии (Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках / Часть 3: Протяжные, шлифовальные и доводочные станки / Издание 3-е. – М.: Изд-во ЦБНТ при НИИ Труда, 1978. – 360 с.) произошло сокращение количества шлифовальных кругов, необходимых для обработки указанных деталей в 2 раза. Наличие технологического эксплуатационного паспорта шлифовального круга характеристики 24A F60 M 7 V позволило применить его в качестве инструмента на проектируемых операциях шлифования.

От ООО «Уральский завод спецтехники»

Главный инженер

От ЮУрГУ:

Доцент, канд. техн. наук

Е.А. Смолянинов

Д.В. Ардашев



Закрывое акционерное общество «Аброинструмент»
Юр. адрес: 454048, г. Челябинск, пр. Ленина, 81. Почт. адрес: 454135, г. Челябинск, ш/я 11346
E-mail: abzao@yandex.ru Тел/факс: /351/ 265-01-38, 725-96-12



УТВЕРЖДАЮ
Директор
«Аброинструмент»

В.А. Стенников

02 2017 г.

г. Челябинск

10 февраля 2017 г.

Акт

апробации и внедрения научно-исследовательской работы
«Определение режимного диапазона эффективной эксплуатации инструмента»

Комиссия в составе представителя ЗАО «Аброинструмент» – коммерческого директора Ю.Г. Пязок и представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на ЗАО «Аброинструмент» (г. Челябинск) внедрен и успешно используется РТМ «Методика разработки технологического эксплуатационного паспорта шлифовального круга», а также комплект технологических эксплуатационных паспортов на шлифовальный инструмент из белого электрокорунда.

Созданные на основе РТМ технологические эксплуатационные паспорта шлифовальных кругов внесены в номенклатуру сопроводительной документации, что позволяет потребителям абразивных инструментов обосновано назначать наиболее эффективные режимы шлифования для обеспечения требуемой точности и шероховатости обработки в конкретных технологических условиях.

Также службой сопровождения потребителей ЗАО «Аброинструмент» принят к использованию комплект технологических эксплуатационных паспортов шлифовальных кругов при обработке конструкционных сталей, легированных хромом и никелем.

Внедрение результатов работы позволит повысить эффективность операций шлифования, проектируемых в условиях машиностроительных предприятий, а также повысить потребительский спрос на позиции абразивных инструментов.

От ЗАО «Аброинструмент»

Коммерческий директор

Ю.Г. Пязок

От ЮУрГУ:

Доцент, канд. техн. наук

Д.В. Ардашев



АО «НПО «Южуралинструмент»

454139, г. Челябинск, ул. Василевского, 81.
Тел./факс (3512) 536-617, 551-637, 551-460, 551-992, 55-14-87.
zuichel@vandex.ru

УТВЕРЖДАЮ
Директор АО «НПО «Южуралинструмент»
В.Н. Смирнов
« 20 » 2017 г.
20 марта 2017 г.

г. Челябинск

Акт
апробации и внедрения научно-исследовательской работы
«Разработка режимных рекомендаций по эффективной эксплуатации шлифовальных кругов различных характеристик в широком диапазоне технологических условий»

Комиссия в составе представителя АО «НПО «Южуралинструмент» – начальника отдела маркетинга Н.Ю. Урусовой и представителя кафедры технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» – доцента, канд. техн. наук Д.В. Ардашева составила настоящий акт в том, что на АО «НПО «Южуралинструмент» (г. Челябинск) проведена апробация научно-исследовательской работы по повышению эффективности операций шлифования кругами различных характеристик, эксплуатирующихся в широком диапазоне изменяющихся технологических условий.

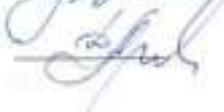
В результате, в качестве сопроводительной нормативной документации на АО «НПО «Южуралинструмент» используется комплект технологических эксплуатационных паспортов для шлифовальных кругов следующих характеристик:

24А F90 L 7 V 50 м/с 24А F60 M 7 V 50 м/с 24А F60 N 7 V 50 м/с
24А F46 H 7 V 50 м/с 24А F36 O 7 V 50 м/с 24А F46 M V 50 м/с

Паспорта созданы для проектирования эффективных операций круглого наружного врезного шлифования материалов Ia и IIIa группы обрабатываемости. Также на предприятии внедрен РТМ «Методика работы с технологическим эксплуатационным паспортом круга», позволяющий выполнять проектирование операций шлифования на основе технологического эксплуатационного паспорта инструмента. Указанные документы расширяют диапазон применимости шлифовальных кругов, что повышает эффективность проектируемых операций шлифования. С сотрудниками объединения проведен семинар, посвященный методике проектирования операций шлифования на основе технологических эксплуатационных паспортов шлифовальных кругов.

В результате внедрения указанной научно-исследовательской работы на указанные позиции абразивных инструментов потребительский спрос увеличился на 15 %, что привело к годовому экономическому эффекту в размере 147 500 рублей.

От АО «НПО «Южуралинструмент»
Начальник отдела маркетинга
От ЮУрГУ:
Доцент, канд. техн. наук

 Н.Ю. Урусова
 Д.В. Ардашев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 107996

**СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Уральский государственный университет" (ГОУ ВПО "ЮУрГУ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011106953

Приоритет полезной модели 24 февраля 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 сентября 2011 г.

Срок действия патента истекает 24 февраля 2021 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.Н. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11) **107 996** (13) **U1**(51) МПК
B24B 49/00 (2006.01)**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011106953/02, 24.02.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.02.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.02.2011

(45) Опубликовано: 10.09.2011 Бюл. № 25

Адрес для переписки:

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, технический отдел

(72) Автор(ы):

Ардашев Дмитрий Валерьевич (RU),
Кошкин Анатолий Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Южно-Уральский
государственный университет" (ГОУ ВПО
"ЮУрГУ") (RU)**(54) СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА****(57) Формула полезной модели**

Система измерения эксплуатационных показателей абразивного инструмента, содержащая блок исходных технологических параметров и характеристик инструмента и обрабатываемой заготовки, в качестве которого использована ЭВМ, испытательную установку, измеритель радиальной составляющей силы шлифования, измеритель тангенциальной составляющей силы шлифования, измеритель шероховатости поверхности заготовки без этапа выхаживания, измеритель шероховатости поверхности заготовки после этапа выхаживания, измеритель износа шлифовального круга, измеритель съема металла с заготовки, измеритель амплитуды колебаний силы шлифования, измеритель частоты колебаний силы шлифования, таймеры, отличающаяся тем, что она снабжена измерителем контактной температуры шлифуемого образца и измерителем глубинной температуры шлифуемого образца, а также усилителем-формирователем сигнала, при этом вход измерителя контактной температуры и вход измерителя глубинной температуры соединены с соответствующими таймерами и измерительной установкой, а выходы соединены с усилителем-формирователем сигнала, выход которого соединен с блоком технологических параметров и характеристик инструмента и обрабатываемой заготовки.

RU 107996 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 113362

**СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНСТРУМЕНТА И ОБРАЗЦА ПРИ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ" (НИУ)) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011141414

Приоритет полезной модели **12 октября 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **10 февраля 2012 г.**

Срок действия патента истекает **12 октября 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **113 362** ⁽¹³⁾ **U1**
(51) МПК
G01N 3/00 (2006.01)

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011141414/28, 12.10.2011

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
12.10.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.10.2011

(45) Опубликовано: 10.02.2012 Бюл. № 4

Адрес для переписки:

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, технический отдел

(72) Автор(ы):

Ардашев Дмитрий Валерьевич (RU),
Дьяконов Александр Анатольевич (RU),
Кошкин Анатолий Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Южно-
Уральский государственный университет"
(национальный исследовательский
университет) (ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ"
(НИУ)) (RU)

RU
113362
U1

**(54) СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ОБРАЗЦА ПРИ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ**

(57) Формула полезной модели

Стенд для исследования взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки, содержащий привод вращательного движения, выполненный в виде коллекторно-бесступенчатого двигателя, привод поступательного движения, диск для закрепления инструмента, инерционный динамометр маятникового типа и нагревательную установку с пирометрическим прибором, связанные с информационно-измерительной системой, выполненной в виде персонального компьютера, отличающийся тем, что диск для закрепления инструмента установлен между двумя подшипниковыми опорами, а приводной вал двигателя соединен с валом диска ременной передачей.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 127923

**СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЦИКЛОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ОБРАЗЦА ПРИ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ" (НИУ)) (RU)*

Автор(ы): *Ардашев Дмитрий Валерьевич (RU)*

Заявка № 2012134174

Приоритет полезной модели **09 августа 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **10 мая 2013 г.**

Срок действия патента истекает **09 августа 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU⁽¹¹⁾ 127 923⁽¹³⁾ U1(51) МПК
G01N 3/58 (2006.01)**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012134174/28, 09.08.2012

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
09.08.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.08.2012

(45) Опубликовано: 10.05.2013 Бюл. № 13

Адрес для переписки:

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Ардашев Дмитрий Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Южно-
Уральский государственный университет"
(национальный исследовательский
университет) (ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ"
(НИУ)) (RU)**(54) СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЦИКЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНСТРУМЕНТА И ОБРАЗЦА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ****(57) Формула полезной модели**

Стенд для исследования многоциклового взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки, содержащий станину, установленные на станине привод вращательного движения, выполненный в виде коллекторно-бесступенчатого двигателя, образец, диск для закрепления инструмента, установленный между двумя подшипниковыми опорами, при этом приводной вал двигателя соединен с валом диска ременной передачей, нагревательную установку с пирометрическим прибором, отличающийся тем, что на станине установлено основание с платформой с закрепленным на ней образцом, и выполненной с возможностью продольного перемещения в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения диска.

RU 127923 U1



ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО
 Федеральное государственное унитарное предприятие
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО - ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР "ЦСКБ-ПРОГРЕСС"
 (ФГУП "ГНПРКЦ "ЦСКБ-ПРОГРЕСС")

ул. Пензенская, д.18, г. Самара, 443009 тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: mail@progress.samara.ru
 ОКПО 43892776, ОГРН 1026300768812, ИНН 6312032094

19-11-07 № 280/29-08

На № _____ от _____

Генеральному директору
 ОАО «УралНИИАШ»
 Чаплыгину Б.А.

ФАКС (351)265-56-46,
 пр. Ленина, 81, г. Челябинск,
 454080.

По вопросу анализа
 заказа

Уважаемый Борис Александрович!

На Ваш запрос о целесообразности заказа на справочник «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах» сообщиво, что данное издание является актуальным. Оно необходимо для руководства при выборе абразивного инструмента и режимов обработки, является настольной книгой для нормировщиков и технологов, занятых проектированием станочных операций.

С уважением
 Начальник отдела интеллектуальной
 собственности и информационного
 обеспечения

С.А.Глебов

Исп. Затольская А.В.
 Тел. (846)228-57-54
 ФАКС (846)992-65-43



Открытое акционерное общество
Магнитогорский Metallургический Комбинат™

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
“Механоремонтный комплекс”

455002, Челябинская обл., г. Магнитогорск, ул. Кирова, 93, инженерный корпус.
Телефон: (3519) 24-32-83, Факс: (3519) 24-75-85, (3519) 24-71-95
http://www.mrk.mmk.ru E-mail: management@mrk.mmk.ru
Р/сч 40702810000000103956 в «Кредит Урал Банке» (ОАО) в г. Магнитогорске
Кор/сч. 30101810700000000949; БИК 047516949;
ОКПО 51478097; ОКВЭД 29.51, 28.11, 27.51, 45.25.4, 60.24.2, 51.53.24
ИНН / КПП 7445017330 / 741450001

Исх. № 318 от 02.05.2007 года
На № _____ от _____ 2007 года

Генеральному директору
ОАО «УралНИИАШ»
Б.А. Чаплыгину

454080, г. Челябинск,
пр. им. В.И. Ленина, 81
Факс: (351) 265 56 46

Об использовании
справочника

Настоящим письмом подтверждаю, что справочник «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах» в четырех экземплярах был приобретен для использования в работе технологической службой предприятия.

Заместитель директора
по качеству

С.А. Андриенко

Л.В. Клокова
Т/ ф.: 24 63 75
klokova@mrk.mmk.ru





ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
КУРГАНМАШЗАВОД

Служба технического развития

Россия, 640027, Курган, пр. Машиностроителей, 17, офис 058

Телефон: (3522) 471-464 факс: (3522) 53-39-96,

телетайп / телекс: 120263 Град

E-mail:@kurganmash.ru, http://www.kurganmash.ru, http://www.kmz.ru

ОГРН 1024500521682, ИНН 4501008142, КПП 450101001

04.10.07

№ 058-7/17

На

№

от

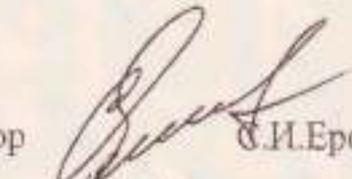
Генеральному директору
ОАО «УралНИИАШ»
Чапдыгину Б.А.
454080, г. Челябинск,
пр. Ленина, 81

Факс (351) 265-56-46

В апреле 2007 года мы получили от Вас 5 экземпляров разработанного Вашим институтом справочника «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах». Один экземпляр справочника находится в научно-технической библиотеке, а четыре переданы для постоянного пользования в Отдел главного технолога.

Справочник, по отзывам, находит практическое применение.

Технический директор


С.И.Ерофсев

Начальник СТР


Е.П.Мануйлов

Исп. Позднякова Н.П.
Тел.(3522) 471-464



ТЮМЕНСКИЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД
 филиал ЗАО «Уралмаш-Буровое оборудование»
 Россия 625048, Тюмень, ул.Новгородская, д.10
 www.integra.ru tsz@integra.ru

тел. 8 (3452) 28-90-03

тел. 8 (3452) 28-90-04

факс 8 (3452) 44-52-83

03.10.07г. № 05/29
 На № _____

ОАО «УралНИИАШ»

Директору

г-ну Б.А. Чаппагину

Отзыв о Справочнике

Уважаемый Борис Александрович!

Представляем Вам информацию о том, что приобретенный нами «Справочник резания, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах» успешно используется в бюро механической обработки технологического отдела.

Директор департамента контроля качества


 05.10.07г.

В.Б.Замураев

Российская Федерация
Закрытое Акционерное
Общество

Научно-производственное предприятие
"Волга-ЭКОПРОМ"

Юридич.адрес: 432042, г. Ульяновск,
ул. Московское шоссе, д.38
тел./факс (8422) 63-92-19
ОГРН 1037301326864

от 10.07 № 11-74/01

на № _____ от _____

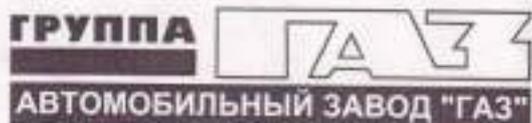
Генерального директора
ОАО «УралНИИАШ»

Чаплыгину Б.А.
454070, г. Челябинск,
пр. Ленина, 81
тел.(351) 265-58-63

Сообщаем Вам, что полученные справочники «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах» в количестве 2шт., используются в технологическом бюро и исследовательской группе КБ.

Зам. директора по науке

/Е. М. Бульжев



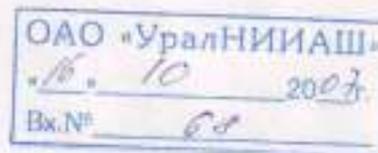
Департамент управления и обучения
персонала

ОАО "ГАЗ", пр. Ленина, 95, г. Нижний Новгород, 603004
тел. (8312)290-89-34

№ _____ / 004-00 _____

На № _____ от _____

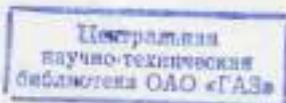
Генеральному директору
ОАО «УралНИИАШ»
Б.А.Чаплыгину

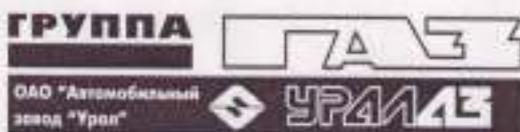


Настоящим подтверждается, что 15 экземпляров справочника «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах» (Челябинск: АТОКСО, 2007) приобретены Центральной научно-технической библиотекой (ЦНТБ ОАО «ГАЗ») для использования в производственной деятельности подразделений предприятия.

Директор ЦНТБ

Е.А. Шумайлова





ОАО «Автомобильный завод «Урал»
456304, Челябинская область,
г. Миасс, пр. Автозаводцев, д. 1
Тел./факс: (3513) 55-16-37
e-mail: gduurat@mail.uralaz.ru <http://www.gaz.ru>

ОАО «Урал НИИАШ»
Генеральному директору
Чаплыгину Б.А.
454080 г. Челябинск,
пр. Ленина, 81.

От 02.10 № 163-19

На № _____ от _____

В 2007г. из Вашего института были получены научно-технической библиотекой завода 3 экземпляра справочника «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и на полуавтоматах».

Справочники используют в своей работе технологи Центральной технологической лаборатории, студенты.

Зав.НТБ

Л.М.Буланова

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА

ул. Минина, д. 28, г. Н. Новгород
603155

Телефон: (831) 436-21-36, 436-25-94

Факс: (831) 436-21-26

E-mail: furs@ntu.nscj-nnov.ru

Генеральному директору
ОАО «УралНИИАШ»
Чаплыгину Б.А.

Дата 05.10.2007 № 19 -15/2/ 61
На № _____ от _____

ПИСЬМО.

Научно-техническая библиотека Нижегородского государственного технического университета **подтверждает**, что в 2007 году НТБ было приобретено у ОАО «УралНИИАШ» 25 (Двадцать пять) экземпляров справочника «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах».

Все организационные вопросы, связанные с приобретением издания, решались с зав. лабораторией "Эксплуатация абразивного инструмента" и исполнителем работы **Ардашевым Дмитрием Валерьевичем**.

Книга включена в фонды и рекомендуется студентам в учебном процессе.



[Handwritten signature]

Г.В. Фурс.



Федеральное агентство по образованию

**ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(филиал)**

Волгоградского государственного технического университета

404121 г. Волжский Волгоградская обл., ул. Энгельса, 42 а
Телефон: (8443) 38-10-49 Факс: (8443) 25-69-50 E-mail: vpi@volpi.ru

Исходящий № 01-10/1045

« 30 » октября 2007 г.

ОАО «Уральский научно-
исследовательский институт
абразивов и шлифования»
Ардашеву Д.В.

Библиотекой Волжского политехнического института (филиал) ВолгГТУ приобретено для использования в учебном процессе три справочника «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с разным управлением и полуавтоматах». Справочник востребован студентами старших курсов специальности «Технология машиностроения».

Директор института

Каблов В.Ф.

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»
 ОАО «ВОСТСИБМАШ»



Юридический и почтовый адрес: Россия, 665805, Иркутская область, г. Ангарск, Первый промышленный массив, квартал 45, строение 15 Тел. (3951) 57-53-17, 57-53-94, 57-87-83, Факс (3951) 57-71-51, 57-64-85.
 E-mail: armaz@irmail.ru. Internet: www.vsmz.lrtel.ru ОКПО 46693072, ОКВЭД 28.21,
 ИНН 3801046683, КПП 380101001. Расчет: 40702510313010000150
 в филиале ОАО «Дальневосточный банк «Иркутский», г.Иркутск БИК 042520776 asc: 3010181020000000776



499 10.2007г. № 37/38-3665
 на № _____ от _____

Генеральному директору
 ОАО «УралНИИАШ»
 Чаплинину Б.А.

454080 РФ г. Челябинск
 пр. им. В.И.Ленина 81

Информируем Вас, что ОАО «ВОСТСИБМАШ» приобрел 4-ре (четыре) экземпляра справочника 2007 г. издания «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах».

Надеемся на дальнейшее сотрудничество.

Генеральный директор

А.Н. Тимофеев

Тел. (3951) 57-37-17
 Минина Г.Ф.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДИПЛОМ

победитель конкурса
на лучшие проекты аспирантов

Аргашев
Дмитрий Валерьевич

Заместитель
Министра образования



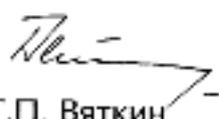
Ю.В. Шленов

Губернатор
Челябинской области



П.И. Сумин

Председатель
экспертного совета



Г.П. Вяткин

Челябинск
2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Губернаторство
Челябинской области

ДИПЛОМ

Победитель конкурса
на лучшие проекты аспирантов

Аргашев
Дмитрий Валерьевич

Заместитель
Министра образования



Губернатор
Челябинской области



Сумин

Г.И. Сумин

Председатель
экспертного совета

Вяткин
Г.П. Вяткин

Челябинск
2004

ДИПЛОМ

победителя конкурса
проектов аспирантов

Аргашев
Дмитрий Валерьевич

Губернатор Челябинской области



Сумин П.И.

Челябинск
2005

Диплом

вручается

Ардашеву Дмитрию Валерьевичу

Кафедра «Технология обработки материалов»

за победу в открытом конкурсе
среди талантливых аспирантов и молодых ученых
Южно-Уральского государственного университета 2010 г.

Данный диплом подтверждает право получения денежного ГРАНТА
в размере 20 000 рублей.

Региональный менеджер по продажам
компании «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия»
по территории Южного Урала



И.В.Бражников

Heavenly Coca-Cola
Heavenly
Passion for Excellence



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИИ



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Ардашев Дмитрий Валерьевич

ЗА ЛУЧШУЮ НАУЧНУЮ РАБОТУ

ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Машиностроительные технологии

2011
*Четвертой
Всероссийской конференции
молодых ученых и специалистов
России*

**“БУДУЩЕЕ
МАШИНОСТРОЕНИЯ
РОССИИ”**

Ректор МГТУ им. Н.Э.Баумана

А.А. Александров

Москва 2011

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА



СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИИ



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Ардашев Дмитрий Валерьевич

ЗА ЛУЧШУЮ НАУЧНУЮ РАБОТУ

ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Машиностроительные технологии

ЗА ЛУЧШУЮ НАУЧНУЮ РАБОТУ

2013

ШЕСТОЙ

машиностроения

*Всероссийской конференции
молодых ученых и специалистов*

“БУДУЩЕЕ

**МАШИНОСТРОЕНИЯ
РОССИИ”**





ДИПЛОМ

победителя областного конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений, расположенных на территории Челябинской области

награждается

АРДАШЕВ

Дмитрий Валерьевич,

молодой ученый

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Южно-Уральский государственный университет»
(национального исследовательского университета)

Губернатор Челябинской области

М.В. Юревич



Постановление от 09.03.2014 г. № 78



ДЕВЯТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

БУДУЩЕЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ РОССИИ

ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Ардашев Дмитрий Валерьевич

ЗА ЛУЧШУЮ НАУЧНУЮ РАБОТУ
ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Машиностроительные технологии

Председатель Отдела
ректор МГТУ им. И.Э. Вавилова

А. А. Александров

