

УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

УДК 621.774.001

СТЕПАНОВ АПОЛЛОН ВЛАДИМИРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ  
ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ  
НАПОЛНИТЕЛЯМИ И АНТИФРИКЦИОННЫМИ НАНОПРИСАДКАМИ

**Специальность 05.02.07** – Технология и оборудование механической и физико-  
технической обработки (технические науки)

## ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени кандидата технических наук

Научный руководитель – Веткасов Николай Иванович,  
доктор технических наук, доцент

Ульяновск, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОПЕРАЦИЯХ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ...	8
1.1. Сущность, технологии применения и механизм действия твердых смазочных материалов на операциях абразивной обработки.....	8
1.2. Составы ТСМ, применяемые на операциях абразивной обработки.....	26
1.3. Пути повышения эффективности применения ТСМ на операциях шлифования.....	28
1.4. Выводы. Цель и задачи исследований.....	37
2. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ И АНТИФРИКЦИОННЫМИ НАНОПРИСАДКАМИ.....	41
2.1. Оценка эффективности смазочного действия твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.....	41
2.2. Оценка расхода ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.....	48
2.3. Математическое моделирование шероховатости обработанной поверхности при плоском шлифовании периферией круга с применением твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.....	52
2.4. Математическое моделирование теплообмена при плоском шлифовании периферией круга с применением твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.....	59
2.5. Выводы.....	75
3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА	

ОПЕРАЦИЯХ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ.....	77
3.1. Методика экспериментальных исследований .....	77
3.2. Исследование технологической эффективности ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании периферией круга .....	95
3.3. Производительность плоского шлифования периферией круга с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками .....	105
3.4. Выводы .....	107
ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	109
4.1. Результаты опытно-промышленных ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.....	109
4.2. Рекомендации и технология применения твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции плоского шлифования .....	111
4.3. Средства автоматизированной подачи ТСМ.....	115
4.4. Техничко-экономические показатели операций плоского шлифования с применением твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.....	117
4.5. Выводы.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КТС	- карандаш твердой смазки;
СМД	- дизельный двигатель судовой малоразмерный;
СОЖ	- смазочно-охлаждающие жидкости;
СОТС	- смазочно-охлаждающие технологические средства;
СПС	- сверхпластичный сплав;
ТСМ	- твердый смазочный материал;
ЦПГ	- цилиндро-поршневая группа;
$K_p$	- коэффициент шлифования;
$K_{ш}$	- коэффициент шлифования по объему;
$B_3$	- ширина заготовки, мм;
$c_3$	- удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К);
$H$	- высота круга, мм;
$P_y, P_z$	- соответственно радиальная и касательная составляющие силы шлифования, Н;
$Q_m$	- режущая способность шлифовального круга, мм <sup>3</sup> /мин;
$R_a$	- среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности, мкм;
$R_z$	- высота неровностей профиля шлифованной поверхности по десяти точкам, мкм;
$R_{max}$	- наибольшая высота неровностей профиля шлифованной поверхности, мкм;
$S_{вр}$	- величина врезной подачи, мм;
$V_{ст}$	- скорость стола, м/мин;
$t_{ф}$	- величина фактического съема припуска (линейный съем металла), мм;
$T_k$	- средняя контактная температура в зоне шлифования, К;
$V_k$	- окружная (рабочая) скорость круга, м/с;
$W_a$	- объем изношенной части рабочего слоя шлифовального круга, мм <sup>3</sup> ;
$W_m$	- объем снятого с заготовки металла, мм <sup>3</sup> ;
а.з.	- активные зерна.

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития промышленности технология машиностроения призвана обеспечить необходимое качество изделий при максимальной производительности труда. Состояние и тенденции развития современного машиностроительного производства показывают, что механическая обработка резанием продолжает оставаться основным технологическим процессом производства в машиностроении, возрастает её удельная трудоемкость. При этом область применения обработки резанием сдвигается в направлении более точных операций [1].

Одним из направлений технологий высокоточной обработки является совершенствование операций шлифования, на которых обеспечивается высокая точность и другие качественные характеристики деталей. В связи с ужесточением требований к качеству продукции шлифование приобретает все большую значимость среди других видов металлообработки. Важным фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность операций шлифования, является применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Новые смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) могут существенно повысить эффективность операций шлифования. Однако известные способы подачи СОЖ в зону обработки не обеспечивают полного использования их технологического потенциала. Причем увеличение окружных скоростей шлифовального круга (ШК) сопровождается повышением плотности воздушных потоков, окружающих шлифовальный круг и препятствующих проникновению СОЖ в контактную зону, и требует существенного увеличения расхода СОЖ, что в свою очередь отражается на санитарно-гигиенических условиях работы шлифовщиков, усложняет задачи очистки, регенерации и утилизации СОЖ. Все острее становятся проблемы экологии, связанные с загрязнением окружающей среды [2].

Одновременно с этим, обработке шлифованием подвергаются изделия, например электротехнического назначения, где применение СОЖ вообще недопустимо.

Решением обозначенных проблем может стать использование твердых смазочных материалов (ТСМ).

В основу работы положены результаты аналитических и экспериментальных исследований эффективности применения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции плоского сухого шлифования.

Для более полного рассмотрения влияния предложенных составов ТСМ на процесс шлифования в ходе исследования были выбраны основные показатели, характеризующие как технологическую эффективность применения ТСМ, так и физические процессы, происходящие в зоне шлифования: теплосиловая напряженность в зоне шлифования, работоспособность ШК, шероховатость и величина остаточных напряжений в поверхностном слое шлифованных поверхностей деталей.

Для расчета эффективности шлифования в производственных условиях получены зависимости, позволяющие оценить, как высотные параметры шероховатости, так и теплосиловую напряженность в зоне шлифования. Разработаны методики, позволяющие рассчитывать температурные поля в заготовке при решении задачи теплопроводности процесса шлифования с применением ТСМ численным методом, и шероховатость поверхностей шлифованных с применением ТСМ.

Результаты исследования защищены патентом на изобретение и тремя свидетельствами о регистрации программного продукта.

Основные результаты научных исследований апробированы путем опытно-промышленных испытаний в условиях действующих производств на операциях заточки фрез из стали Р6М5 ООО «ДИЗ» (г. Димитровград), на операции шлифования пуансонов и матриц из стали Х12Н ООО «Автопромэко» и операции заточки фрез из стали Р6М5 в ООО «Сервис Газ» (г. Ульяновск). Полученные данные согласуются с результатами лабораторных исследований.

Автор выражает искреннюю благодарность зав. каф. «Технология машиностроения» УлГТУ, д.т.н. Н. И. Веткасову, сотрудникам кафедры

“Технология машиностроения” УлГТУ за помощь в работе и творческое сотрудничество.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОПЕРАЦИЯХ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Сущность, технологии применения и механизм действия твердых смазочных материалов на операциях абразивной обработки

С начала XX века в трудах В.Д. Кузнецова, А.С. Ахматова, А.М. Розенберга, Ю.М. Виноградова, Н.Н. Зорева, Т.Н. Лоладзе, А.И. Исаева, В.А. Кривоухова, Н.И. Резникова, Л. В. Худобина и других ученых отмечено существенное влияние смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) на процессы резания. В настоящее время СОТС применяются для повышения производительности процессов механической обработки, качества обработанных деталей и снижения износа режущего инструмента. В зависимости от агрегатного состояния выделяют следующие виды СОТС: *газообразные; жидкие; пластичные; твердые.*

Традиционно на металлорежущих станках применяют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), позволяющие повысить скорость резания или стойкость режущего инструмента, качество обработанных поверхностей, смывать стружку и шлам с обрабатываемых заготовок и узлов станков.

Затраты на производство и обслуживание СОЖ в различных случаях составляют от 5 % до 15 % производственных расходов при затратах на инструмент порядка 4 % [3]. Например, в 2016 г. в Германии объем потребления СОЖ оценивался в 1 000 900 тонн. При средней стоимости 1 тонны СОЖ в 500 евро затраты на приобретение СОЖ составили порядка 500 млн. евро, затраты на их утилизацию в год превысили лишь в одной Германии 720 млн. евро [3]. Высокие эксплуатационные расходы на СОЖ являются одной из основных причин сокращения их использования на металлорежущих станках.

Ужесточающиеся экологические требования к безопасности эксплуатации всех видов производственного оборудования накладывают серьезные ограничения на возможность применения СОЖ на современном этапе развития машиностроения [3].

В настоящее время приняты законы, направленные на защиту здоровья человека, включая защиту от вредного воздействия СОЖ. Это связано с тем, что используемые СОЖ содержат химически-активные присадки, вызывающие тяжелые заболевания кожи и дыхательных путей. Кабинетная защита станка уменьшает вредное воздействие СОЖ, но не исключает его полностью [3].

В ряде случаев использование СОЖ недопустимо по техническим и технологическим причинам, например, при шлифовании магнитных головок, роторов электродвигателей и других электротехнических изделий. СОЖ практически не применяют при шлифовании заготовок из материалов, склонных к засаливанию рабочей поверхности ШК, при обработке заготовок из титановых и коррозионно-стойких сталей и сплавов, пластмасс и керамики.

СОЖ в ряде случаев не применяют при заточке режущего инструмента (РИ) в силу следующих причин [4]: ухудшаются санитарно-гигиенические условия труда; затрудняется наблюдение за зоной обработки; при подаче СОЖ поливом возрастает вероятность образования на обработанных поверхностях РИ шлифовочных трещин из-за их резкого охлаждения СОЖ после выхода из контакта с рабочей поверхностью круга.

Отмеченная тенденция на операциях заточки РИ наблюдается не только на российских машиностроительных предприятиях. Анализируя современный парк заточного оборудования, следует отметить, что часть заточных станков как отечественного, так и зарубежного производства не оснащены системами подачи СОЖ, например, станки «SSG 600 A-DC» (Германия, рис. 1.1), «3E642» (Россия, рис.1.2).



Рис. 1.1. Станок для заточки «SSG 600 A-DC»



Рис. 1.2. Заточной станок ZE642

Альтернативой шлифования на станках с использованием СОЖ является «сухое» шлифование с применением твердого смазочного материала (ТСМ), обладающего эффективным смазочным действием [5]. Замена СОЖ на ТСМ особенно эффективна при заточке дорогостоящего РИ (протяжек, фасонных червячных фрез, резцовых головок, метчиков) [6]. Среди современного РИ значительную долю составляет инструмент из быстрорежущих сталей, который в первую очередь подвергают переточке (сверла, концевые фрезы и др.) [7, 8]. По

данным Малышева В.И. [61] и Кремня З.И. [9] со ссылкой на шведскую фирму «Сандвик Коромант», в общем объеме производства доля режущего инструмента быстрорежущий инструмент составляет до 70%.

ТСМ поставляют на производство в различных формах, одна из которых представляет собой цилиндр, называемый карандашом, а твердый смазочный материал в таком виде – карандашом твердой смазки (КТС) (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Карандаши твердой смазки

ТСМ наносится на рабочие поверхности ШК после правки (табл.1.1).

Таблица 1.1

Перечень рабочих поверхностей ШК в процессе заточки РИ

Затачиваемый инструмент	Шлифуемая поверхность РИ	Тип ШК, по ГОСТ 2424	Рабочая поверхность ШК
1	2	3	4
Резец	Передняя поверхность	11	Торец
Резец	Главная задняя поверхность	11	Торец
	Вспомогательная задняя поверхность	11	Торец

1	2	3	4
Фреза дисковая	Задняя поверхность	1, 11	Торец; периферия
Фреза концевая	Задняя поверхность	То же	То же
Фреза фасонная червячная	Передняя поверхность	То же	То же
Сверло	Задняя поверхность	1	Периферия
	Ленточка	То же	То же
Метчик	Задняя поверхность	1	Периферия
Зенкер	Задняя поверхность	1, 11	Торец, конус; периферия
Развертка	Задняя поверхность	1, 11	Торец, конус; периферия
Протяжка	Передняя поверхность	11	Торец, конус
Резцовая головка	Передняя поверхность	11	Конус

Как правило, при переточке РИ по перечисленным выше поверхностям в зоне соприкосновения ШК и РИ в большинстве случаев имеет место линейный контакт (метчики, сверла, фрезы и пр.).

Для обеспечения возможности использования ТСМ на операциях плоского шлифования, в том числе на операциях заточки РИ, следует рассмотреть технологические приемы применения ТСМ. Анализируя работы [5 – 6, 10 – 15], можно сделать вывод, что в настоящий момент разработано достаточно много способов применения ТСМ на операциях механической обработки, позволяющих реализовать все их преимущества.

В зависимости от способа подачи ТСМ можно выделить следующие технологии их применения:

1. Подача в зону обработки вручную.
2. Подача в зону обработки с помощью специальных механических средств.

В зависимости от объекта нанесения и агрегатного состояния ТСМ можно выделить следующие способы их применения:

1. Нанесение ТСМ на рабочую поверхность ШК в твердом или жидком агрегатном состояниях. В качестве примера можно привести устройство для подачи ТСМ в жидком агрегатном состоянии (рис. 1.4) [12].

Работа данного устройства осуществляется следующим образом. Перед началом обработки на шлифовальном станке в бачок 7 закладывают ТСМ (например, парафин), подают напряжение на тепловой элемент 17 и расплавляют ТСМ, переводя его в жидкое агрегатное состояние. При достижении заданной температуры, например, для парафина  $t_{\text{плавл}} = 54^{\circ}\text{C}$ , потенциометр 6 отключает напряжение на тепловом элементе 17 и в дальнейшем периодически подключает его при понижении температуры расплавленного ТСМ ниже заданного значения.

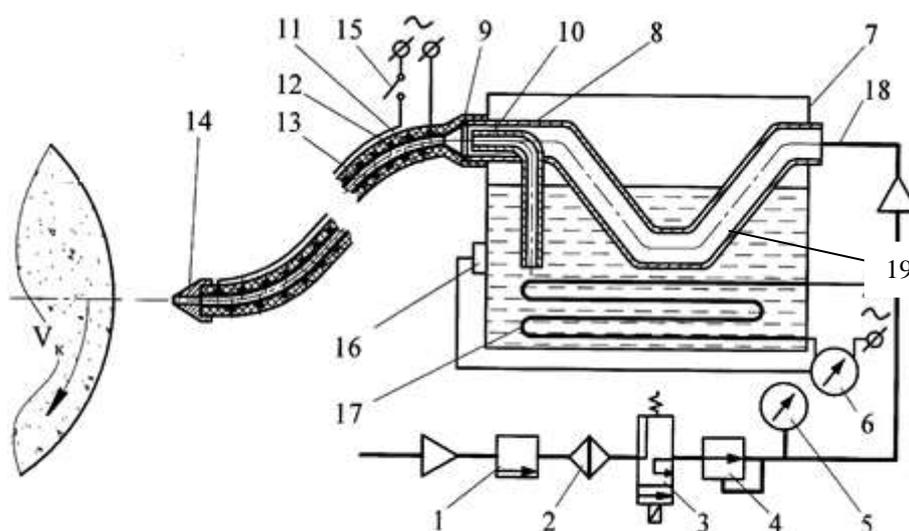


Рис. 1.4. Нанесение ТСМ на рабочую поверхность ШК: 1 – кран; 2 – фильтр-влагоотделитель; 3 – воздухораспределитель (устройство управления); 4 – редукционный клапан; 5 – манометр; 6 – потенциометр; 7 – бачок для ТСМ; 8 – смеситель, 9 – диэлектрическая прокладка; 10 – трубка для подвода к смесителю расплавленного ТСМ; 11 – гибкая трубка из диэлектрического материала, 12 – гибкий тепловой элемент; 13 – гибкая оболочка из теплоизоляционного влагонепроницаемого материала, 14 – сопло; 15 – выключатель; 16 – датчик температуры; 17 – тепловой элемент; 18 – система трубопроводов; 19 – ТСМ

2. Нанесение ТСМ на заготовку. Одно из устройств для реализации этого способа (рис. 1.5) работает следующим образом. Брикет 7 ТСМ перед началом цикла шлифования отводят от заготовки в крайнее верхнее положение и фиксируют в этом положении на штоке 14 штифтом 15. Поворотом рукоятки 12 на  $(90 - 180)^\circ$  освобождают фиксатор (штифт 15) для подачи ТСМ на заготовку. К обрабатываемой поверхности заготовки 2 брикет 7 прижимается под действием пружины 16. ТСМ, контактирующий с нагретой поверхностью заготовки, плавится и равномерно тонким слоем наносится на обрабатываемую поверхность. На штоке 14 ход брикета 7 ограничен стопорной шайбой 11 [12].

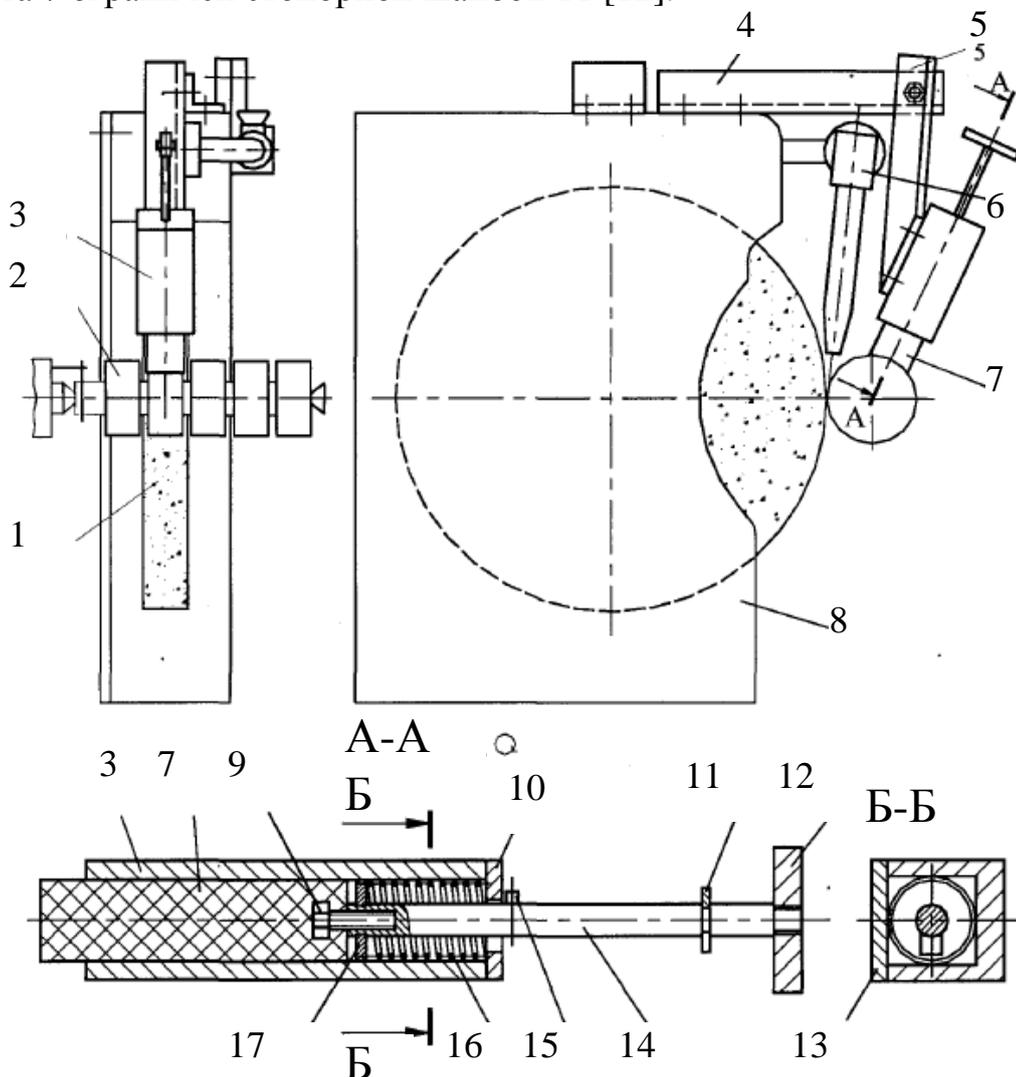


Рис. 1.5. Установка для поэтапной подачи ТСМ и СОЖ в зону обработки [12]: 1 – ШК; 2 – заготовка; 3 – корпус; 4, 5 – кронштейны; 6 – сопло для подачи СОЖ; 7 – ТСМ; 8 – защитный кожух; 9 – болт; 10 – крышка; 11 – шайба; 12 – рукоятка; 13 – крышка; 14 – шток; 15 – штифт; 16 – пружина; 17 – шайба

3. Одновременное нанесение твердого и пластичного смазочных материалов на ШК и заготовку. В качестве примера ниже представлены способы шлифования при одновременном нанесении расплавленного ТСМ на рабочую поверхность ШК и ПСМ на обрабатываемую поверхность заготовки (рис. 1.6).

На рабочую поверхность ШК 2 наносят ТСМ в расплавленном виде с помощью сопла 3. На обрабатываемую поверхность заготовки наносят ПСМ либо с помощью пористого эластичного брикета 4 (рис. 1.6,а), либо с помощью контактного ролика 6 (рис. 1.6, б).

4. Совместная подача ТСМ и ПСМ в зону обработки. В качестве примера на рис. 1.7 приведена конструкция устройства для подачи твердого и пластичного смазочных материалов в зону контакта круга и заготовки при круглом наружном шлифовании [12].

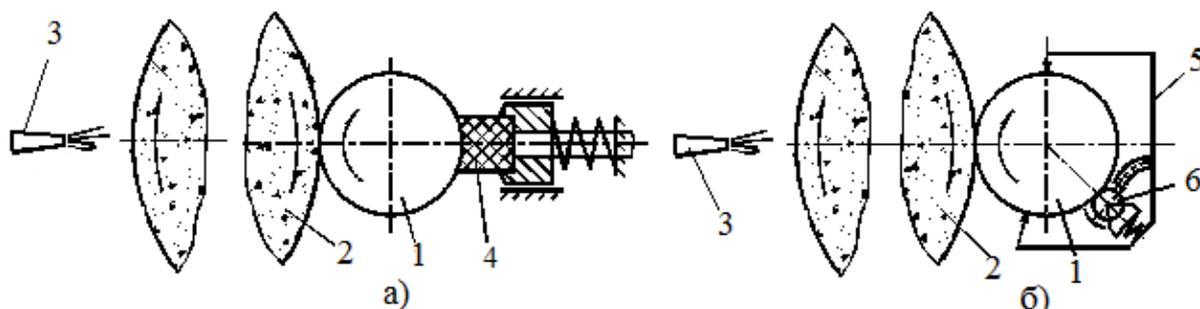


Рис. 1.6. Комбинированные способы подачи ТСМ и ПСМ [16]: а – подача ПСМ с помощью пористого эластичного брикета; б – подача ПСМ с помощью контактного ролика; 1 – заготовка; 2 – круг; 3 – сопло для подачи расплавленного ТСМ; 4 – пористый эластичный брикет; 5 – измерительная скоба; 6 – контактный ролик

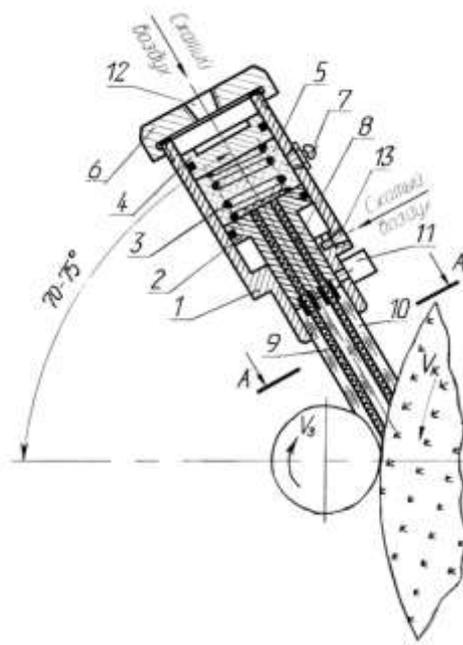


Рис. 1.7. Совместная подача ТСМ и ПСМ в зону обработки: 1 – стакан; 2 – поршень; 3 – пружина; 4 – поршень; 5 – пластичная смазка; 6 – крышка; 7 – пресс-масленка; 8, 9 – осевые каналы; 10 – ТСМ; 11 – фиксирующий механизм; 12, 13 – отверстия для подачи сжатого воздуха

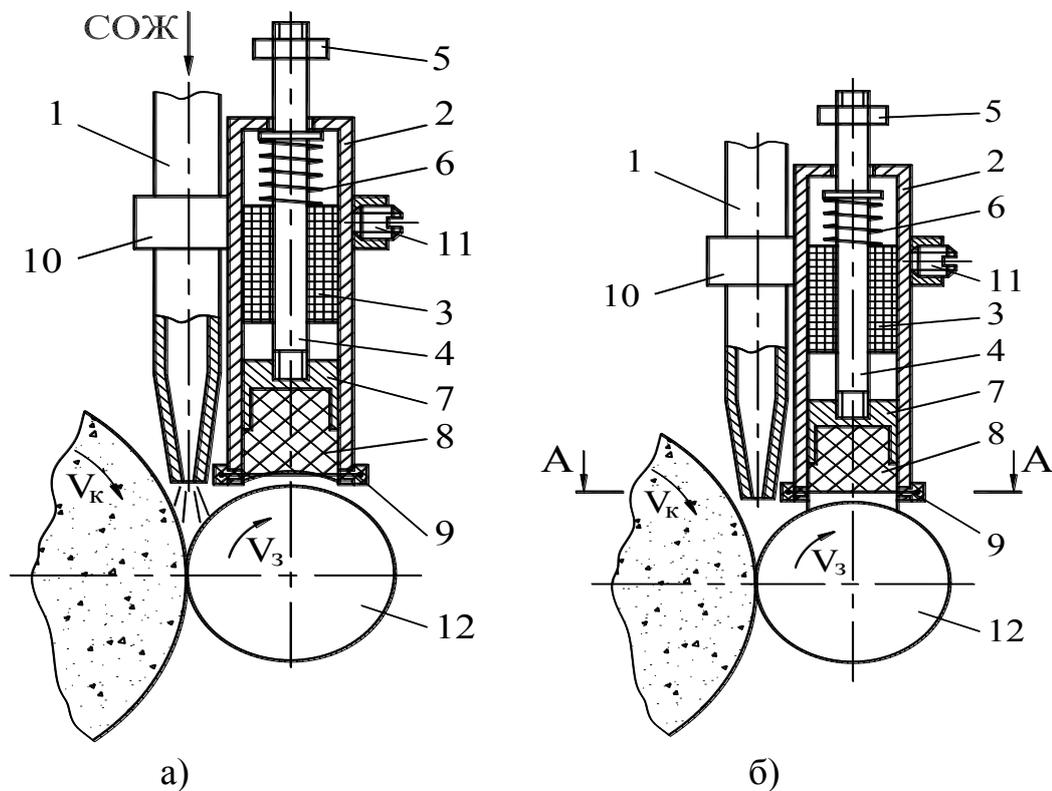


Рис. 1.8. Устройство для поэтапной подачи ТСМ и СОЖ: а – режим шлифования с подачей водной СОЖ на этапах врезания и съема основного припуска; б – режим шлифования с подачей ТСМ на обрабатываемую поверхность заготовки (без подачи СОЖ) [12]

В работе [12] приводятся результаты исследования 9 способов шлифования (табл. 1.2), среди которых наибольшей эффективностью выделяется поэтапный способ СП2, обеспечивший снижение величины  $Ra$  по сравнению с базовым способом СП1 до 2-х раз.

Таблица 1.2

Способы подачи СОТС при круглом наружном врезном шлифовании с применением СОЖ (5 %-ная эмульсия Аквол-6) и ТСМ (50% - технический воск, 50% дисульфид молибдена  $MoS_2$ ) [12]

Обозначение способа подачи СОТС	Этапы цикла шлифования	
	Врезание и съём основной части припуска	Выхаживание
СП1	СОЖ	СОЖ
СП2	СОЖ	ТСМ
СП3	СОЖ	СОЖ + ТСМ
СП4	СОЖ + ТСМ	СОЖ + ТСМ
СП5	ТСМ	ТСМ
СП6	ТСМ	СОЖ
СП7	ТСМ	СОЖ + ТСМ
СП8	СОЖ + ТСМ	СОЖ
СП9	СОЖ + ТСМ	ТСМ

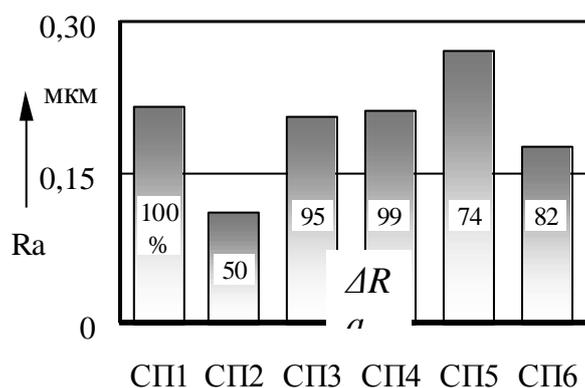


Рис. 1.9. Влияние способа подачи СОТС на шероховатость шлифованной поверхности [12]: заготовка – сталь Р6М5; СП1–СП6 – способ подачи СОТС по табл. 1.2;  $S_{sp} = 0,1$  мм/мин; круг 1 300' 40' 76' 25А F60 М 5 V А; (–)

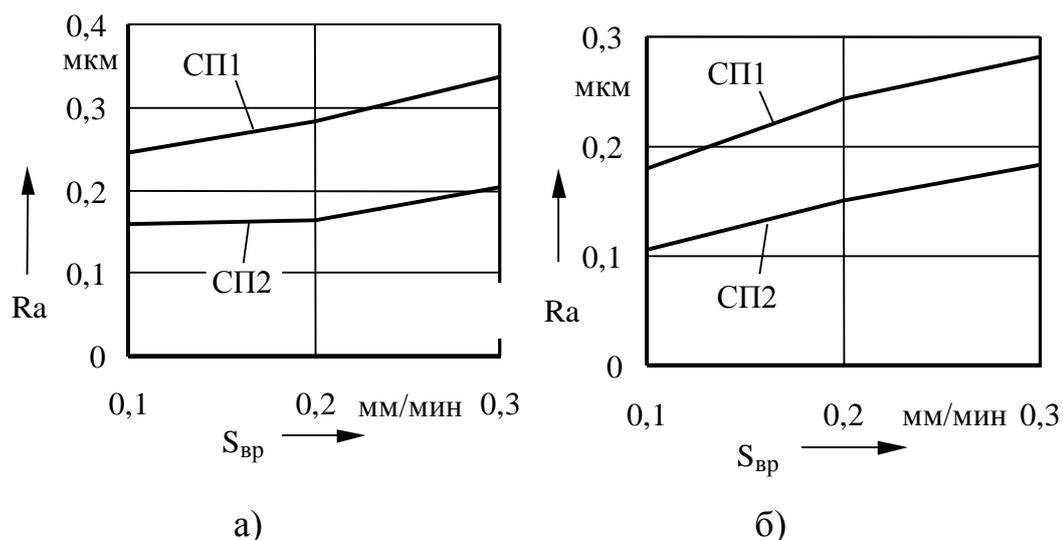


Рис. 1.10. Зависимость параметра  $Ra$  шлифованной поверхности заготовки от врезной подачи  $S_{вр}$  [12]: а, б – материал заготовки соответственно из стали 30ХГСА и P6M5; СП1, СП2 – способ подачи СОТС по табл. 1.2; круг 1 300' 40' 76 25A F60 M 5 V A

При использовании СОТС на операциях механической обработки выделяют смазочное, охлаждающее, моющее, диспергирующее и демпфирующее, которые в значительной степени зависят от свойств смазочного материала и условий шлифования (рис. 1.11 – 1.13). Например, на рис. 1.11 представлено изменение средней контактной температуры в зоне шлифования при применении ТСМ в процессе выхаживания заготовки. Видно, что с течением времени средняя контактная температура в зоне шлифования уменьшается, что обусловлено уменьшением снимаемого с течением времени припуска.

На процесс шлифования с применением ТСМ оказывают влияние режим обработки и материал обрабатываемой заготовки. Например, увеличение врезной подачи (рис. 1.12) приводит к увеличению средней контактной температуры  $T_k$ . Изменение температуры обрабатываемой поверхности заготовки, в частности её нагрев, позволяет наносить на него слой материала ТСМ. Видно, как изменяются условия контакта брикета ТСМ с обрабатываемой поверхностью заготовки в зависимости от режима обработки (рис. 1.12). Например, при шлифовании заготовки диаметром 70 мм из стали 30ХГСА кругом 25AF60K16V5 с врезной подачей  $S_{вр} = 0,3$  мм/мин температура обрабатываемой поверхности практически сразу возрастает

до температуры не менее 320 К, что позволяет наносить ТСМ на обрабатываемую поверхность заготовки при наличии легкоплавкого связующего.

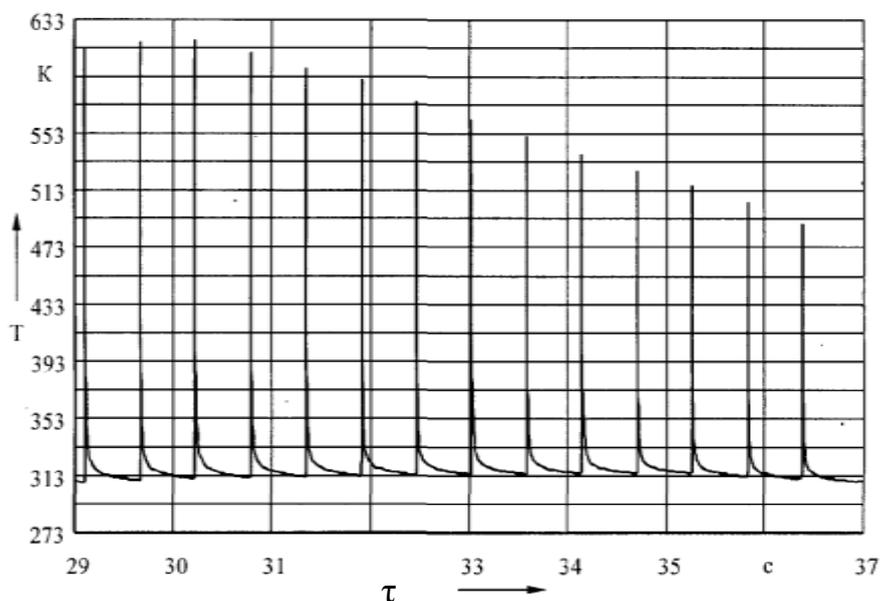


Рис. 1.11. Зависимость температуры элементарного участка поверхности заготовки от времени выхаживания с подачей ТСМ [12]: материал заготовки – сталь 30ХГСА;  $D_3 = 70$  мм; круг – 25AF60K16V5

Материал обрабатываемой заготовки в зависимости от физико-механических свойств по-разному влияет на процесс шлифования (рис. 1.13). Более высокие контактные температуры наблюдаются при шлифовании заготовок из труднообрабатываемых материалов, что также влияет на нагрев обрабатываемой поверхности заготовки. Однако не только материал, но и геометрия заготовки оказывает влияние на процесс шлифования (рис. 1.14).

Для обеспечения высокой производительности обработки при применении ТСМ, а также качества обработанных поверхностей важно оценивать среднюю контактную температуру в зоне шлифования, которая в свою очередь предопределяет многие показатели процесса шлифования [17 – 19].

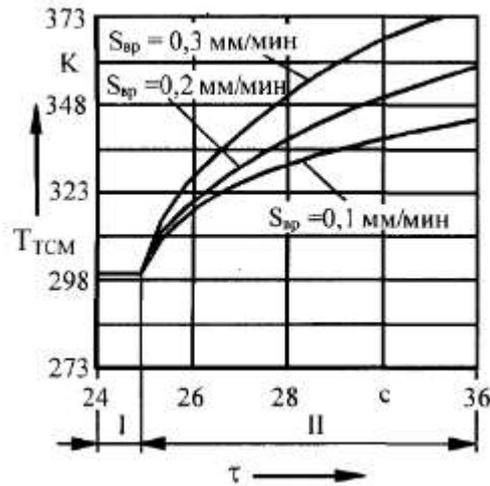


Рис. 1.12. Зависимость температуры контакта заготовки с брикетом ТСМ от этапа шлифования и врезной подачи  $S_{sp}$ : I – шлифование СОЖ; II – шлифование с ТСМ; материал заготовки сталь 30ХГСА,  $D_3 = 70$  мм; круг - 25АФ60К16V5

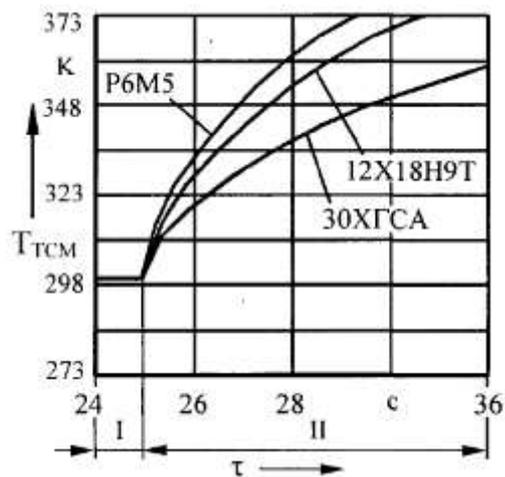


Рис. 1.13. Зависимость температуры контакта заготовки с брикетом ТСМ от этапа шлифования и материала заготовки: I – шлифование с СОЖ; II – шлифование с ТСМ; материал заготовки - сталь 30ХГСА,  $D_3 = 70$  мм; круг - 25АФ60К16V5;  $S_{sp} = 0,2$  мм/мин

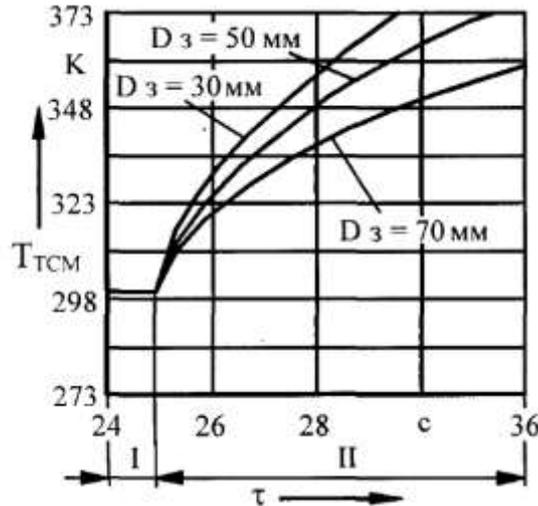


Рис. 1.14. Зависимость температуры контакта заготовки с брикетом ТСМ от этапа шлифования и диаметра заготовки: I – шлифование с СОЖ; II – шлифование с ТСМ; материал заготовки - сталь 30ХГСА; круг -25AF60K16V5;  $S_{гр.} = 0,2$  мм/мин

Исследованию тепловых явлений при шлифовании с применением и без применения СОТС посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых. Среди них можно выделить: А.А. Маталина; А. И. Исаева, С. С. Силина; М.П. Шатунова, В. Ф. Совкина; В. А. Сипайлова [20], А. В. Якимова [21]; П. И. Ящерицына, А. К. Цокура ; А. Н. Резникова [22]; Д. Г. Евсеева; С.Г. Редько; С.Н. Корчака, А.А. Кошина; В.И. Клочко; В.И. Островского, Л.В. Худобина и др..

Анализ известных зависимостей для расчета средней контактной температуры показал, что они не учитывают расход и состав ТСМ. Следует отметить, что задача определения температурного поля в заготовке, формируемого при наличии ТСМ на абразивных зернах и в порах ШК сложна, аналитически трудно решается.

После нанесения ТСМ на рабочую поверхность ШК поверхность режущих и давящих абразивных зерен оказывается покрытой тонким слоем ТСМ, которая предохраняет их от непосредственного соприкосновения со свежесформованными (ювенильными) поверхностями заготовки, отчего уменьшается адгезия металла к абразивным зернам [13]. В результате этого, коэффициент трения абразивных зерен по металлу уменьшается, что приводит к снижению сил резания и средней контактной температуры, которые в значительной степени влияют на износ абразивных зерен, производительность процесса обработки и качество поверхностей

обрабатываемой заготовки. Наличие ТСМ на поверхности режущих зерен облегчает также их врезание в металл и способствует его более интенсивному диспергированию.

Например, в работе [13] установлено, что коэффициент трения при применении ТСМ уменьшается с увеличением скорости скольжения и увеличивается с ростом нагрузки при контакте круга 24AF4601В с образцом из стали X18H12Т.

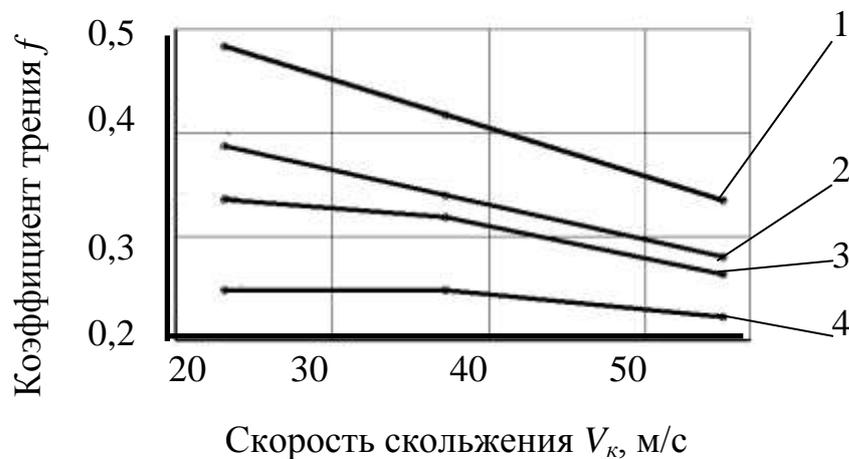


Рис. 1.15. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения и нагрузки: 1 – без смазочного материала, нагрузка 40 Н; 2 – без смазочного материала, нагрузка 20 Н; 3 – со смазочным материалом MoS<sub>2</sub>, нагрузка 40 Н; 4 – со смазочным материалом MoS<sub>2</sub>, нагрузка 20 Н

Значительное снижение коэффициента трения (в 1,5 – 2 раза) (рис. 1.15) и уменьшение износа образца (в 3 – 5 раз) наблюдается при средних скоростях резания (25 – 35 м/с) [13]. Наличие ТСМ на рабочей поверхности ШК существенно влияет и на износ абразивных зерен (рис. 1.16).

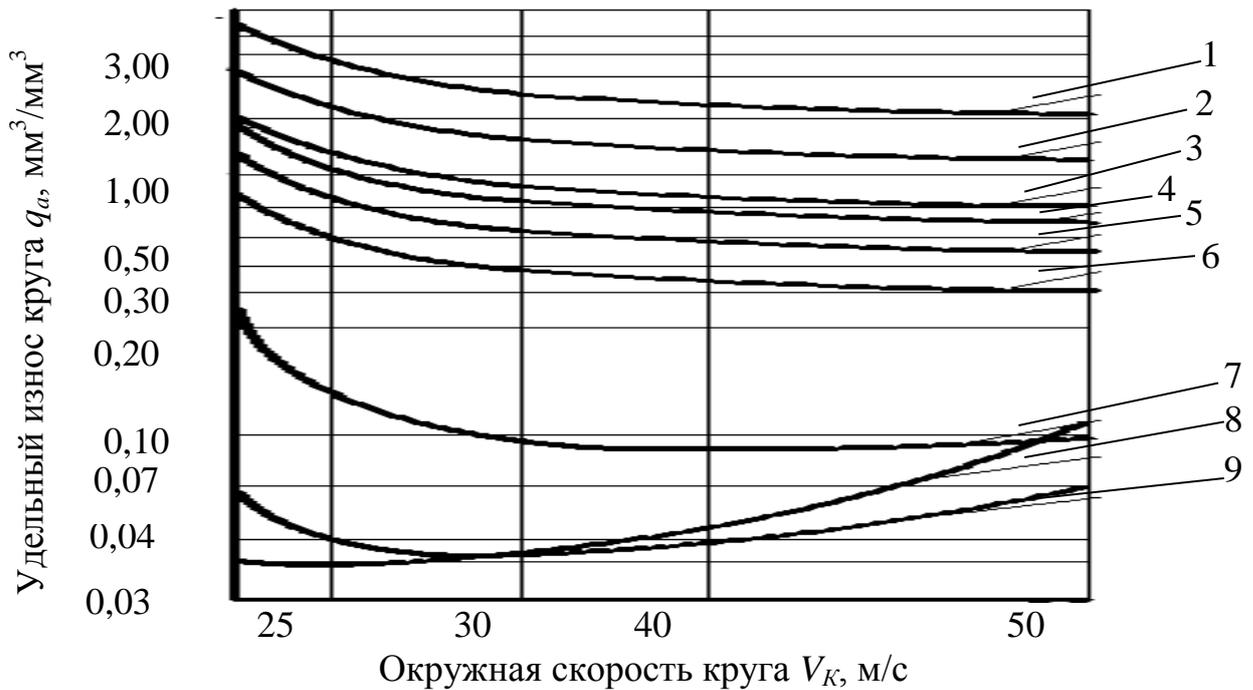


Рис. 1.16. Зависимость удельного износа круга от условий шлифования [17]: 1 – круг 24AF46O1B без смазочного материала,  $S = 150$  мм/мин; 2 – круг 24AF46O1B без смазочного материала,  $S = 75$  мм/мин; 3 – круг 24AF46O1B без смазочного материала,  $S = 40$  мм/мин; 4 – круг 24AF46O1B без смазочного материала,  $S = 150$  мм/мин; 5 – круг 24AF46O1B без смазочного материала,  $S = 75$  мм/мин; 6 – круг 24AF46O1B без смазочного материала,  $S = 40$  мм/мин; 7 – круг 24AF46O1B со смазочным материалом,  $S = 150$  мм/мин; 8 – круг 24AF46O1B со смазочным материалом,  $S = 75$  мм/мин; 9 – круг 24AF46O1B со смазочным материалом,  $S = 40$  мм/мин.

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 1.15, можно констатировать, что применение ТСМ при шлифовании заготовок из стали X18H12T оказывает существенное влияние на снижение удельного износа ШК с увеличением окружной скорости круга. При этом, наименьший удельный износ наблюдается при  $V_K = 35 - 45$  м/с в диапазоне подач  $S = 40 - 100$  мм/мин. В этих условиях величина удельного износа круга 24AF46O1B не превышает  $0,04 - 0,05$  мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>, что в 10 – 20 раз меньше, чем при работе без смазки [13].

Таким образом, установлено, что применение ТСМ существенно уменьшает трение в зоне контакта ШК и заготовки, износ ШК, что приводит к снижению

теплосиловой напряженности, а также способствует увеличению его работоспособности.

Как было показано выше, ТСМ влияет на процессы трения в зоне контакта ШК и заготовки, износ ШК, процесс диспергирования обрабатываемой поверхности, что существенным образом влияет на процесс формирования шероховатости. Для обеспечения выходных параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей заготовок важно их оценивать с учетом как режимов обработки, материала обрабатываемой заготовки, характеристики и типоразмера ШК, так и состава и расхода ТСМ.

В настоящее время известен широкий круг зависимостей для расчета шероховатости шлифованных поверхностей, учитывающий в той или иной степени влияние СОТС. Среди них можно выделить: Королева А.В. [23]; Филимонова Л.Н. [24]; Правикова Ю.М. [25]; Новоселова Ю.К. и др.

На наш взгляд, наиболее полно учтено влияние СОТС на шероховатость шлифованной поверхности в работе [26]. В этой работе М. А. Белов показал, что процесс формирования микропрофиля шлифуемой поверхности представляет собой процесс переноса геометрических характеристик микрорельефа круга на обрабатываемую поверхность заготовки. При этом, основной характеристикой рельефа круга, от которой непосредственно зависят высота и шаг микронеровностей шлифованной поверхности, является динамическая разновысотность активных зерен  $H_{0д}$ , зависящая от динамических характеристик процесса шлифования, а также от статической разновысотности активных зерен  $H_{0ст}$ , соответствующей глубине залегания половины из всех выступающих над связкой зерен, измеренной от вершины наиболее выступающего абразивного зерна.

Однако наличие ТСМ, динамических факторов (увеличение уровня вибраций [24]) в процессе шлифования существенным образом изменяет шероховатость шлифованной поверхности. В сущности, влияние данных факторов приводит к изменению динамической разновысотности активных зерен. Например, увеличение уровня вибраций эквивалентно увеличению  $H_{0ст}$  [24]. В связи с этим, в работе [23]

введено понятие динамической разновысотности активных зерен (режущих и давящих) (а.з.):

$$H_{0д} = e^{q\tau} \frac{H_{0СТ}}{\sigma_{СТ}} \sqrt{\sigma_{СТ}^2 + \sigma_{Д}^2 + \sigma_{ПР}^2}, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_{СТ}^2$  – дисперсия статического распределения активных зерен в  $\text{мм}^2$ , определяется по формуле [23]:

$$\sigma_{СТ}^2 = 0,2h_a^2, \quad (1.2)$$

где  $h_a$  – толщина слоя абразива, снимаемого вершиной правящего инструмента при правке, мм;  $\sigma_{Д}^2$  – дисперсия относительных радиальных колебаний круга и заготовки, вызванных вибрацией,  $\text{мм}^2$ ;  $\sigma_{ПР}^2$  – дисперсия относительных радиальных перемещений круга и заготовки, вызванных влиянием прочих неучтенных факторов,  $\text{мм}^2$ ; можно принять  $\sigma_{ПР}^2 = \beta\sigma_{СТ}^2$  ( $\beta = 0,1 \div 0,2$  – коэффициент влияния  $\sigma_{ПР}^2$  на  $\sigma_{СТ}^2$ );  $H_{0СТ}$  – статическая разновысотность активных зерен рабочей поверхности ШК, равна [26]:

$$H_{0СТ} = h_0 / \sqrt[k]{F(h_{СК})}, \quad (1.3)$$

где  $h_{СК}$  – расстояние уровня скалывания активных зерен от наиболее выступающих вершин зерен, соответствующее заданной вероятности, мм;  $k$  – показатель степени;  $F(h_{СК})$  – функция распределения вершин зерен после правки круга.

Амплитуда относительных радиальных колебаний круга и заготовки в процессе шлифования (средняя «динамическая» амплитуда)  $A_{Д}$  [23] зависит от многих случайных факторов, поэтому её распределение подчиняется нормальному закону с дисперсией:

$$\sigma_{Д}^2 = \frac{2}{\pi} A_{Д}^2. \quad (1.4)$$

Как показал М. А. Белов в работе [26] амплитуда динамических колебаний  $A_{Д}$  для условий шлифования кругами из электрокорунда и карбида кремния зависит от времени шлифования, а также состава применяемой СОЖ.

$$A_{Д}(\tau) = \frac{j_c}{j_c + j_p} \cdot A_{СТ} \left( \frac{\mu_0}{\mu} \right)^P \cdot e^{K_{СОЖ} m_0 \tau}, \quad (1.5)$$

где  $m_0$  – показатель степени, характеризующий интенсивность роста амплитуды при шлифовании с эталонной СОЖ; определяется экспериментально;  $K_{СОЖ}$  –

коэффициент, учитывающий влияние свойств СОЖ на интенсивность роста амплитуда ( $K_{\text{СОЖ}} \leq 1$ );  $\tau$  – время шлифования с;  $j_C, j_P$  – жесткость системы и жесткость резания, Н/мм, определяются по [26];  $\mu_0, \mu$  – вязкость эталонной и проверяемой СОЖ соответственно, Па · с;

$P$  – показатель степени, определяемый теоретически или экспериментально [26].

Таким образом, конечную формулу для расчета динамической разновысотности активных зерен рабочей поверхности ШК  $H_{0д}$  с учетом выражений (1.2) и (1.3) можно представить в виде:

$$H_{0д}(\tau) = e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0СТ}}{\sigma_{СТ}} \sqrt{(1 + \beta)\sigma_{СТ}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{j_C^2 \cdot A_{СТ}^2 \cdot (\mu_0/\mu)^{2p} e^{K_{\text{СОЖ}} m_0 \tau}}{[j_C + j_P]^2}}. \quad (1.6)$$

Однако, формула (1.6) не учитывает расход СОТС, находящегося в зоне шлифования.

Как показали исследования Е. С. Киселева в работе [27], изменение расхода СОТС квазилинейно приводит к изменению шероховатости шлифованной поверхности. Исходя из этого, а также формулы (1.5), согласно которой амплитуда динамических колебаний квазилинейно влияет на динамическую разновысотность активных зерен на рабочей поверхности ШК, в расчете динамической разновысотности а.з. на рабочей поверхности ШК следует учитывать не только изменение амплитуды во времени и влияние на неё СОТС, но и его расход.

## 1.2. Составы ТСМ, применяемые на операциях абразивной обработки

В настоящее время при изготовлении ТСМ используют широкую гамму материалов [4, 6, 28 - 33]: неорганические, со слоистой (ламеллярной) структурой; органические; мягкие металлы; полимерные. Известен опыт применения других видов ТСМ, например, таких как лед и его смеси [6].

В качестве ТСМ обычно выбирают вещества, имеющие ламеллярную структуру [4, 6, 28]. Слоистые материалы, порошки металлов и полимеров применяют не только как самостоятельное смазочное средство, но и как наполнители или присадки к пластичным, жидким и газообразным СОТС.

В технологических процессах механической обработки заготовок, в основном, применяют три группы ТСМ [6]:

1. Индивидуальные.

ТСМ первой группы можно использовать при обработке заготовок из жаропрочных, инструментальных, тугоплавких сталей и сплавов, при профильном и глубинном шлифовании.

2. Универсальные, применяемые в узлах трения машин и механизмов, а также в технологических целях при металлообработке.

3. Специальные, как правило, многокомпонентные ТСМ для металлообработки, изготавливаемые специализированными предприятиями и разработчиками. Они эффективнее и стабильнее по качеству, чем смазочные материалы первой и второй групп.

Кроме того, по результатам выполненного патентного поиска можно выделить составы ТСМ, применяемых на операциях механической обработки [28-33]:

- хлорфторуглеродное масло (3,7 - 7,2 %); низкомолекулярный полиэтилен (0,9 - 1,8 %); минеральное масло (6,8 - 13,5 %); нитрид титана/ оксид алюминия (10 - 54,3 %); стеариновая кислота (остальное);  
– порошок сверхпластичного сплава (2 - 10 %), гудрон жировой (8 - 40 %), стеариновая кислота (остальное) и другие.

Среди зарубежных ТСМ можно отметить такие составы, как: «Эдивакс» фирмы «Эдисон Тул Ко» (Великобритания) для нанесения на резцы, пилы, сверла; «Флюид» фирмы «Стар Кат Компаунд»; «АСТ» фирмы «Клюбер» (Германия) для смазывания метчиков; «F-26» фирмы «Фиат» (Италия) для смазывания абразивных кругов и лент [6].

Проанализировав показатели производительности и качества изготавливаемой продукции при использовании ТСМ, можно сделать вывод, что ТСМ, имеющие высокие эксплуатационные показатели, имеют в своем составе большое количество компонентов. Нередко используются дорогостоящие материалы (дисульфид молибдена, нитрид бора, кластерные алмазы, нитрид титана), что, соответственно,

усложняет технологию изготовления и существенно увеличивает себестоимость ТСМ.

Среди всех используемых ТСМ наибольшее распространение получил дисульфид молибдена в силу высоких смазочных свойств, обусловленных его ламеллярной структурой (рис. 1.17).

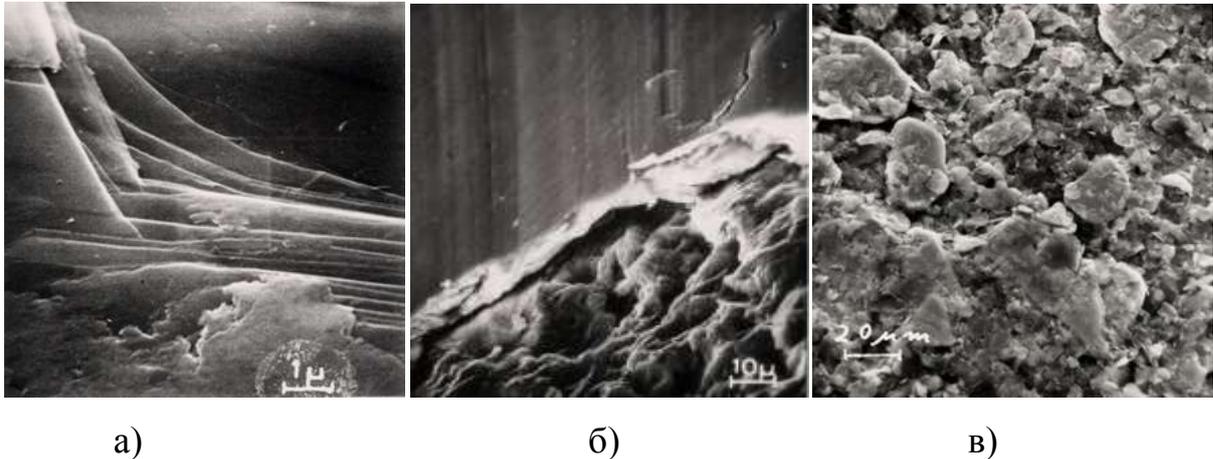


Рис. 1.17. Слоистая структура дисульфида молибдена [34]: а – увеличение 1 мкм; б – увеличение 10 мкм; в – увеличение 20 мкм

### 1.3. Пути повышения эффективности применения ТСМ на операциях шлифования

#### 1.3.1. Применение нанопорошков металлов и углеродсодержащих материалов в качестве наполнителей ТСМ

Одним из основных направлений повышения эффективности современного машиностроительного производства путем применения СОТС на операциях механической обработки, в том числе на операциях шлифования, является системное совершенствование составов и технологии применения ТСМ.

Оптимальные составы и способ подачи ТСМ позволяют получить положительный комплексный результат по обрабатываемости, качеству и себестоимости, тем самым, являясь в ряде случаев единственным элементом технологической системы, который обеспечивает разрешение достаточно сложного комплекса технико-экономических противоречий.

Как показал анализ научно-технической и патентной информации существенное влияние на технологическую эффективность применения ТСМ оказывают наполнители и присадки. При этом наибольший интерес представляют высокодисперсные материалы (размер частиц от 5 до 0,5 мкм) и наноматериалы (размер частиц менее 100 нм).

По мнению ряда ученых нанотехнологии являются одной из самых перспективных областей, которая уже сейчас вносит существенный вклад в развитие многих отраслей науки и техники. Особый интерес вызывает применение нанотехнологий с точки зрения влияния на физико-химические, механические и другие свойства материалов [35 – 38].

Рядом ученых было исследовано влияние наноприсадок на трибологические, физические и химические процессы в местах контакта трущихся поверхностей [39 – 43]. По результатам исследований было установлено, что введение наноприсадок позволяет существенным образом влиять на эти процессы.

Так Ильин А. П. [39] установил, что введение нанопорошков меди и никеля в моторное масло «SAE10W-30» позволяет уменьшить износ (табл. 1.3) и снизить коэффициент трения (табл. 1.4) в узле трения накладки и вала до 2-х раз, что в свою очередь влияет на контактную температуру.

Таблица 1.3

Зависимость износа накладки от концентрации смеси нанопорошков меди и никеля в масле

№	Концентрация смеси нанопорошков, %, масс.	Изменение массы (абсолютное, г. $10^{-4}$ )	Скорость изменения массы, г· $10^{-4}$ /ч
1	0	38	25
2	0,05	27	18
3	0,10	4	2,7
4	0,20	19	13
5	0,40	48	32

Как видно из рис. 1.18, концентрация нанопорошков неоднозначно влияет на трибологические процессы в узле трения, в то же время имеется оптимум по концентрации нанопорошков: 0,15 ... 0,20 % мас., при котором коэффициент трения и температура минимальны.

Таблица 1.4

Зависимость коэффициента трения  $f_{тр}$  от концентрации смеси нанопорошков меди и никеля в масле при различных нагрузках

№	Концентрация смеси нанопорошков, %, масс.	Нагрузка, МПа								
		20	40	80	160	320	640	960	1200	1300
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,00	0,04	0,08	0,08	0,11	0,13	0,17	0,20	0,32	0,54
2	0,05	0,05	0,05	0,07	0,10	0,10	0,11	0,15	0,21	0,39
3	0,10	0,04	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10	0,13	0,18	0,26
4	0,15	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,11	0,16	0,24
5	0,20	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,17	0,23
6	0,30	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,12	0,16	0,25
7	0,40	0,18	0,24	0,28	0,28	0,34	0,28	0,28	0,32	0,51
8	0,80	0,21	0,25	0,20	0,26	0,24	0,30	0,68	Св.	Св.

Св. – сваривание (схватывание) накладки и вала

Яхьяев Н. Я. [40] в качестве добавок к моторному маслу М-8-Г<sub>2</sub> использовал пиролитический графит (фуллереновую сажу) и наноразмерные частицы фуллерена, что позволило ему улучшить трибологические характеристики узла трения цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) и кривошипно-шатунного механизма судовых малоразмерных дизелей (СМД) типа Ч 8,5/11. Экспериментально установленная необходимая норма смазочной композиции включает в себя наноразмерные частицы фуллеренов в сумме - 0,82 % мас., графитовой сажи – 0,62 % мас., моторного масла – 98,5 % мас. Образующиеся поверхностные пленки с высокодисперсными наноразмерными фуллереновыми частицами имеют толщину (до 0,01 мм),

достаточную для уменьшения коэффициента трения, улучшения виброшумовых характеристик СМД.

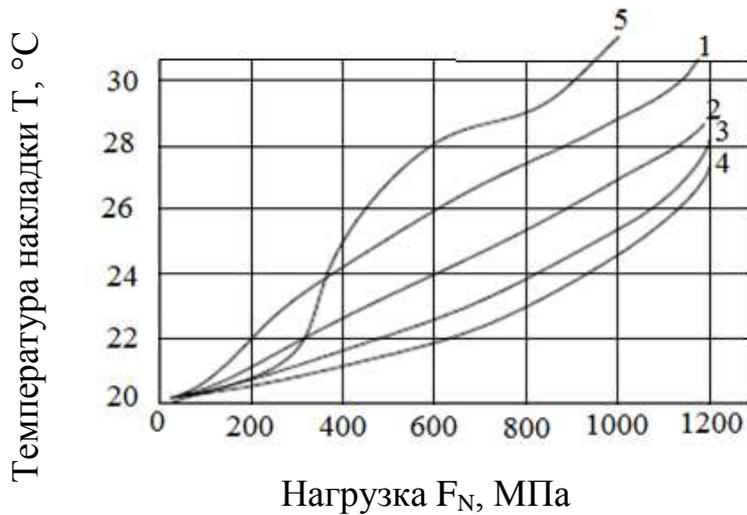


Рис. 1.18. Зависимость температуры накладки  $T$  от нагрузки  $F_N$ : 1 – чистое масло; суспензии смесей нанопорошков меди и никеля в масле (% мас.): 2 – 0,05; 3 – 0,10; 4 – 0,20; 5 – 0,40

НПО «Нанотех» разработал ряд материалов, применяемых в качестве присадок к моторным и промышленным маслам. К ним относятся: кластерные алмазы с размерами до 100 ангстрем, ультрадисперсный наноалмазографит [44].

Грабовским М. В. и Новиковым И. И. [45 - 46] было предложено в качестве добавок к смазочным материалам использовать ультрадисперсный порошок сверхпластичного сплава (СПС) из цветных металлов. Установлено, что сверхпластичные сплавы в широком диапазоне условий обработки выполняют функции ТСМ.

Применение сверхпластичных сплавов в качестве твердых смазочных материалов при абразивной обработке основано на высокой степени наносимости сверхпластичного сплава, как твердого тела, на АИ [45 - 46]. Использование порошка сверхпластичного сплава в качестве присадки уменьшает расход ТСМ, наносимого на поверхность ШК.

Экспериментально установлено, что порошок сверхпластичного сплава значительно снижает температуры "вспышек" и среднюю контактную температуру в зоне обработки.

В заявляемых вариантах многокомпонентного ТСМ [45] порошок сверхпластичного сплава выполняет функцию антиприжоговой добавки, а также обеспечивает снижение средней контактной температуры в зоне абразивной обработки. Уменьшение содержания порошка сверхпластичного сплава менее нижних пределов не гарантирует отсутствие прижога, а увеличение содержания порошка СПС в ТСМ более верхних пределов не дает дополнительного снижения температуры при полном предотвращении прижога.

Известно испытание смазочных композиций следующих составов: эксплуатационно-восстановительная смазочная композиция для автотракторных двигателей с добавкой наноразмерных порошков металлов (НРП) латуни с фосфором и дисульфида молибдена (базовый смазочный материал – М-10-Г<sub>2</sub>, ГОСТ 10541); эксплуатационная смазочная композиция для автотракторных трансмиссий с добавкой НРП бронзы и оксида алюминия (базовый смазочный материал – ТМ-3-18, ГОСТ 23652); смазочная композиция для тяжело нагруженных узлов трения с добавкой НРП железа, никеля и цинка (базовый смазочный материал – литол-24, ГОСТ 21150). Установлено, что введение НРП в указанных выше смазочных композициях позволяет снизить момент трения в парах трения до 1,6 раза, уменьшить износ контактирующих поверхностей пар трения до 2,2 ... 2,4 раз.

Известно применение добавок из ультрадисперсного порошка алмазографита (УДПАГ) с размером частиц 40 – 100 нм, полученного методом детонационного синтеза в углекислом газе [47]. Исследованиями эффективности смазочных композиций ЦИАТИМ-201 и Литол-24 с добавлением УДПАГ установлено, что при применении указанных композиций в подшипниках наблюдается снижение величины износа подшипников в 1,2 раза, температуры – на 16 %, момента трения – на 13 %.

Таким образом, убедительно доказано, что применение нанопорошков металлов и углеродсодержащих материалов в многокомпонентных ТСМ вызывает снижение силы трения, температуры и износа в зоне контакта трущихся поверхностей. Данные эксплуатационные свойства востребованы и при механической обработке. В связи с чем, в разделе 2 – 3 данной диссертационной

работе, как будет показано далее, будут проведено исследование влияния нанопорошков металлов обладающих хорошей смазочной способностью и высокой теплопроводностью на эффективность плоского шлифования.

### **1.3.2. Применение высокодисперсных и нано- керамических материалов в качестве наполнителей ТСМ**

Для повышения эффективности ТСМ возможно применение не только высокодисперсных и нанопорошков металлов, но и высокодисперсных материалов из метало – и минералокерамики. Например, компания «WagnerSpezialschmierstoffe» (Германия) для снижения трения, увеличения ресурса двигателя (механической коробки передач и дифференциала), экономии топлива и уменьшения шумов предлагает высокодисперсную керамическую присадку «INDIGO Micro-Ceramic», состоящую из смеси высокодисперсных и нанопорошков металлокерамики [48].

Известно смазочное средство, содержащее в качестве присадки керамические наночастицы, выбранные из группы, включающей  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ , глинистые минералы и/или их смеси, а также термостабильные карбонаты и/или сульфаты[48].

Перекрестов А. П. [42] для снижения коэффициента трения предложил использовать наноприсадки магнитного действия из частиц  $Fe_3O_4$  и олеиновой кислоты, применение которых при воздействии на них магнитным полем, по мнению автора, позволит снизить коэффициент трения, сохранить смазочные свойства смазочного материала в течение длительного времени, уменьшить интенсивность изнашивания пар трения.

Однако значительная часть производимых высокодисперсных порошков керамических материалов дорогостоящие. Например, цена CBN производства компании «Henan Union Abrasives Corp» (Китай) 0,1 – 1 \$ за 1 карат.

Имеются менее дорогостоящие компоненты, например, диоксид титана  $TiO_2$  производства компании «PRETIOX» (Чехия): цена 150 руб/кг. Или же электрокорунд, приблизительно стоящий 80 руб/кг.

Использование менее дорогостоящих компонентов в совокупности с другими компонентами, входящими в состав ТСМ, при всей их очевидной эффективности, является весьма затратным. Выходом из сложившейся ситуации является замена дорогостоящих компонентов ТСМ на более доступные, широко распространенные в природе, но схожие по структуре и химическому составу.

К ним можно отнести весьма распространенные высокодисперсные вещества, среди которых можно выделить голубую глину и диатомит. Оба этих материала относятся к группе керамических материалов. ТСМ на основе этих материалов по структуре и химическому составу схожи с используемыми в смазке эффективными, но дорогостоящими компонентами. Наибольший интерес с научной точки зрения представляет монтмориллонит, а также его менее качественный аналог – бентонит, являющиеся, как и дисульфид молибдена, слоистыми материалами.

Монтмориллонит – глина, относящаяся к сложным полиминеральным системам с низкосимметричными кристаллическими модификациями. В чистом виде монтмориллонит в природе не встречается, зато он входит в состав различных видов глин, например, нативной (табл. 1.5). Кристаллиты низкотемпературного кварца, корунда и кальцита, входящие в состав нативной глины, имеют тригональную решетку[49].

Таблица 1.5

## Фазовый состав нативной глины

Фаза	Объемная доля, %
$\beta$ -кварц, $SiO_2$	55
Монтмориллонит $(Al_2[OH]_2\{Si_4O_{10}\} \cdot nH_2O)$	20
Хлорит $(Mg,Fe)_{6-2x}(Al,Fe)_{2x}[OH]_8\{Si_{4-2x}Al_{2x}O_{10}\}$	10
$\alpha$ -корунд, $Al_2O_3$	15

Слоистые минералы типа монтмориллонитов и хлоритов имеют кристаллические решетки преимущественно моноклинной сингонии. Содержание

диоксида кремния в виде полиморфных модификаций кварца и кристобалита составляет 55%, в том числе около 30 % свободного кварца. Объемные доли аморфных составляющих не превышают 10 %. Межплоскостное расстояние  $d(001)$  составляет 0,98 нм, что свидетельствует о высокой лиофильности структуры нативного монтмориллонита.

Однако цена монтмориллонита, как и бентонита, также относительно высока. Поэтому было выдвинуто предложение о возможной их замене более дешевыми природными аналогами, например, Ундоровской голубой глины (ТУ 9369-002-02590678-2006), отличающейся высоким содержанием монтмориллонита, с размерами частиц от 100 нм и выше (рис.1.19), либо высокодисперсным порошком диатомита производства ООО «Диатомовый комбинат» (г. Инза) с дисперсностью частиц от 500 нм до 7 мкм (ТУ 5761-001-25310144-99).

Как видно из анализа работ по исследованию трибологических процессов в узлах трения, введение наноразмерных присадок позволяет снизить коэффициент трения в зоне контакта пар трения. Данные результаты открывают определенные перспективы использования наноразмерных частиц при абразивной обработке материалов для снижения коэффициента трения и температуры в зоне контакта АИ и заготовки.

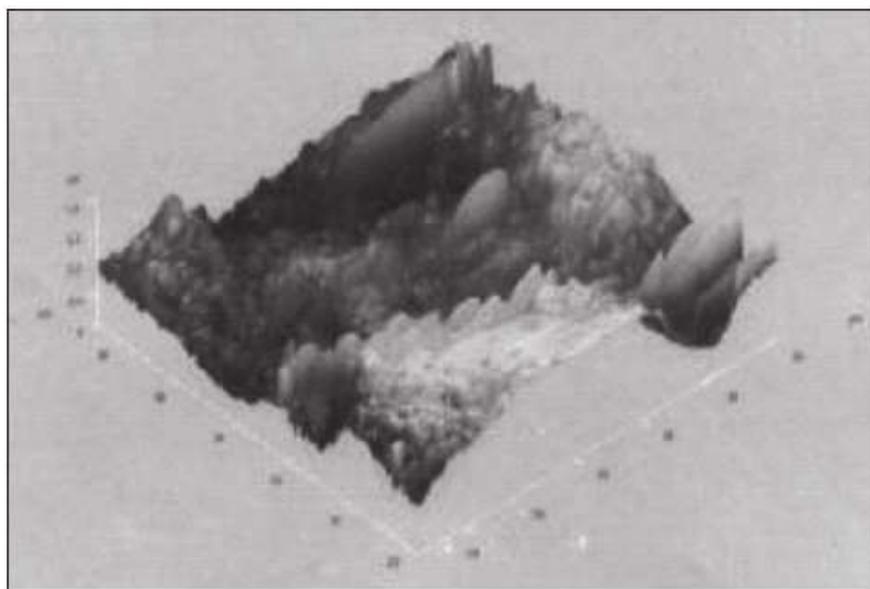


Рис. 1.19. Трехмерная структура поверхности частиц Ундоровской голубой глины [50]

### 1.3.3. Влияние наноматериалов на интенсификацию смазочного действия технологических сред

По современным представлениям наночастицы размером менее 100 нм находятся на границе квантового и классического микромиров, и это крайне метастабильное и неоднородное состояние определяет их уникальные физико-механические свойства, например, повышенную 2 ... 7 раз микротвердость, 1,5 ... 2 раза прочность при растяжении с крупнозернистыми аналогами. Наноразмерный эффект имеет две стороны: чисто масштабную, пространственную и как физико-химическое явление, когда от размера (количество атомов и молекул) зависят свойства кластеров [47].

Таким образом, механизм интенсификации смазочного действия за счет введения наноматериалов может иметь различный эффект. С одной стороны – это изменение химических и физико-механических свойств самой технологической среды за счет как влияния квантовых свойств самих наночастиц, так и за счет зависимости различных свойств от размерности самого наноматериала. Например, уменьшение размера наночастиц приводит к существенному снижению температуры плавления и изменению явлений переноса теплоты в целом [47], что существенным образом влияет и на смазочные свойства наполнителя смазочной технологической среды.

С другой стороны, эффект интенсификации смазочного действия различных технологических сред может заключаться в увеличении проникающей способности и эффективной площади покрытия контактирующих в процессе трения тел. Например, эффективная площадь покрытия нанопорошка алюминия с размерностью 50 – 70 нм и массой 1 г. составляет 62 м<sup>2</sup>, а эффективная площадь покрытия нанопорошка меди с размерностью 50 – 70 нм и массой 1 г. составляет 12 м<sup>2</sup>. Все это позволяет в максимальной степени снизить трение как на режущих, так и давящих а.з (рис. 1.20).

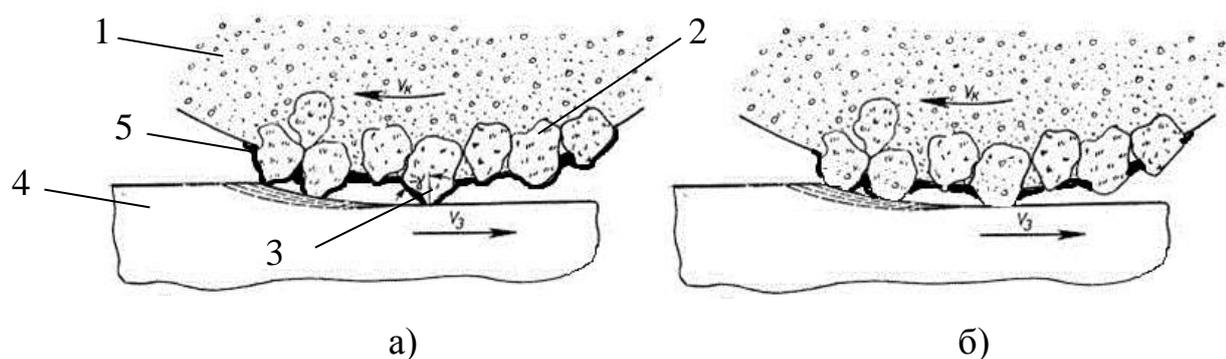


Рис. 1.20. Рабочая поверхность ШК до (а) и после (б) обработки с нанесенным слоем ТСМ: 1 – ШК; 2 – давящие а.з.; 3 – режущие а.з.; 4 – заготовка; 5 – ТСМ

Также следует отметить, что высокая удельная площадь поверхности наночастиц и нанопорошков предопределяет их высокую химическую и каталитическую активность [47], что также может положительно сказываться на интенсификации смазочного действия.

Таким образом, совокупность эффектов наблюдаемых при введении наноматериалов в различные технологические смазочные среды может существенным образом интенсифицировать смазочную способность, что в свою очередь повлияет и на показатели эффективности технологического процесса шлифования.

#### 1.4. Выводы. Цель и задачи исследований

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической и патентной информации в области технологии и техники применения ТСМ на операциях механической обработки позволил сделать следующие выводы:

1. Эффективным средством повышения производительности и экологической безопасности операций механической обработки, особенно, выполняемых без применения СОЖ, является применение ТСМ. Транспортирование необходимого количества ТСМ в зону контакта АИ и заготовки создает благоприятные условия для увеличения производительности бездефектной обработки.

В машиностроении ТСМ, применяют на операциях шлифования, выполняемых без применения СОЖ, в том числе на операциях заточки РИ (концевые фрезы, сверла и др.) из быстрорежущих сталей периферией АИ. Шлифование с применением ТСМ можно выполнить как всухую, так и с применением водных СОЖ простого химического состава в течение всего цикла шлифования или только на этапе съема основного припуска. Применение ТСМ обеспечивает эффективное транспортирование смазочного материала непосредственно в зону контакта АИ и заготовки.

2. В настоящее время на операциях шлифования применяется достаточно широкая номенклатура ТСМ, отличающихся составом, физико-химическими, функциональными и эксплуатационными свойствами и стоимостью.

3. При шлифовании ТСМ осуществляют смазочное, демпфирующее, диспергирующее и, в меньшей степени, охлаждающее действия, которые существенным образом зависят как от состава ТСМ, так и условий их применения, что сказывается на выходных параметрах обработанных поверхностей заготовок. В первую очередь изменяется средняя контактная температура в зоне шлифования, поэтому важно оценивать смазочное и диспергирующее действия ТСМ с точки зрения влияния на теплосиловую напряженность в зоне шлифования. Известные теплофизические модели операций шлифования недостаточно полно учитывают влияние состава ТСМ и условий их применения на уровень средней контактной температуры в зоне обработки и шероховатости шлифованных поверхностей.

4. Смазочное и диспергирующее действия ТСМ можно существенным образом усилить путем их легирования различными наполнителями. Наиболее привлекательным для операций шлифования является использование в составе ТСМ высокотемпературных наполнителей на основе неорганических порошковых материалов (дисульфид молибдена, графит, нитрид бора), полимеров, окислов металлов и фторидов. Малоизученным, но потенциально перспективным, является применение в качестве наполнителей высокодисперсных природных материалов (голубая глина, диатомит, мраморная крошка) и наноматериалов (фуллереновая сажа,

таунит, нанопорошки металлов, ультрадисперсные порошки сверхпластичных сплавов и др.).

5. До сих пор не выработано единого мнения о механизме смазочного действия ТСМ с наполнителями из наноматериалов и дешевых высокодисперсных природных материалов, о влиянии их фазового перехода на кинетику смазочного действия. Отсутствуют приемлемые для практики зависимости, которые позволили бы оценивать на стадии проектирования операций шлифования технологическую эффективность различных составов ТСМ с наполнителями из высокодисперсных природных материалов и антифрикционных наноприсадок в зависимости от их состава и условий применения. В частности, известные математические модели не учитывают влияние состава и расхода ТСМ на формирование геометрических характеристик поверхности и физико-химических свойств поверхностных слоев шлифованных деталей.

Целью настоящей работы является повышение эффективности операции плоского шлифования путем применения ТСМ с наполнителями из высокодисперсных материалов и антифрикционных наноприсадок.

Для достижения поставленной цели необходимо решать следующие задачи:

1. Разработать теплофизическую модель процесса шлифования с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, которая позволит определить температуру в зоне контакта шлифовального круга и заготовки с учетом перехода ТСМ из твердого агрегатного состояния в жидкое, на примере плоского шлифования периферией круга.

2. Выполнить компьютерное моделирование температурных полей при различных режимах обработки с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

3. Разработать математическую модель шероховатости поверхности, шлифованную с применением ТСМ. Данная модель позволит рассчитать шероховатость  $Ra$  с учетом состава и расхода ТСМ для широкого диапазона условий.

4. Выполнить проверку адекватности разработанных математических и компьютерных моделей.

5. Разработать составы, методику и провести экспериментальное исследование смазочного действия ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

6. Получить регрессионные зависимости показателей технологической эффективности ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании периферией круга от скорости стола, врезной подачи, зернистости и твердости ШК. Данные зависимости позволят оценить технологическую эффективность ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании заготовок из быстрорежущей стали.

7. Разработать рекомендации по применению ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании, позволяющие осуществить выбор ТСМ, разработать технические приемы и технику их применения. Определить мероприятия по промышленной, пожарной и экологической безопасности при применении ТСМ на шлифовальных операциях.

8. Провести опытно-промышленные испытания предложенных разработок на машиностроительных предприятиях г. Ульяновска и Ульяновской области.

9. Оценить технико-экономическую эффективность применения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции заточки РИ из стали Р6М5.

10. Разработать конструкции устройств для контактного и бесконтактного нанесения ТСМ на рабочую поверхность ШК в твердом и жидком агрегатном состояниях.

## **2. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ И АНТИФРИКЦИОННЫМИ НАНОПРИСАДКАМИ**

### **2.1. Оценка эффективности смазочного действия твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками**

Как показано в главе 1, применение ТСМ играет важную роль в повышении эффективности шлифовальных операций, при выполнении которых смазочное, демпфирующее и диспергирующее действия ТСМ оказывают существенное влияние на теплонапряженность шлифования и износостойкость АИ. Смазочные пленки ТСМ, наносимые на рабочую поверхность АИ, способны значительно снизить трение пары «АИ – заготовка» и, соответственно, уменьшить теплообразование в зоне шлифования. Как показали результаты исследований ряда авторов повысить смазочную способность ТСМ можно путем целенаправленного введения в их состав наполнителей из высокодисперсных материалов и наноприсадок, в качестве которых может быть использован достаточно широкий спектр материалов [28 – 48]. В связи с этим, одной из ответственных задач, решаемых в ходе проектирования технологии шлифования, является выбор наиболее эффективного состава ТСМ с учетом большого количества факторов. Подбор состава ТСМ, позволяющего стабилизировать режущую способность АИ, – задача весьма сложная и ответственная. Одним из возможных путей решения этой задачи является оценка их функциональных, в частности, смазочных свойств ТСМ.

В связи с этим, в работе было предпринято исследование смазочного действия ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

Исследование смазочной способности ТСМ проводили по схеме «металлический диск – колодка» на установке, смонтированной на базе плоскошлифовального станка 3Е711ВФ2 (рис. 2.1) по ниже приведенной методике.

В качестве пары трения использовали металлический диск из стали Р6М5, НРС 63...65, и абразивный брусок 20x20x150 25А F60 М 5 V А (рис. 2.2).

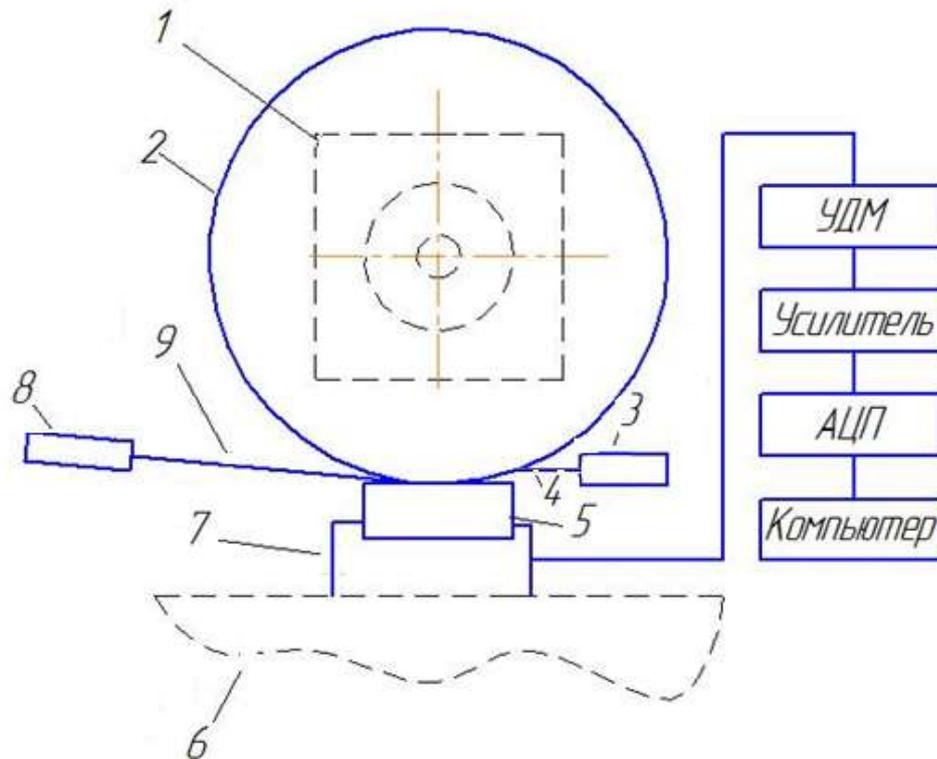


Рис. 2.1. Схема установки для измерения смазочной способности ТСМ на базе станка 3E711ВФ2: 1 – шпиндельный узел станка 3E711ВФ2; 2 – металлический диск; 3 – плазматрон; 4 – плазма; 5 - абразивный брусок; 6 – магнитная плита; 7 – УДМ; 8 – термодатчик; 9 – лазерный луч



Рис. 2.2. Абразивные бруски 20x20x150 25A F60 М 5 V А

В ходе исследования оценивали коэффициент трения  $f_{TP}$ :

$$f_{TP} = P_z / P_y, \quad (2.1)$$

где  $P_z$ ,  $P_y$  – тангенциальная и нормальная составляющие силы шлифования, контролируемые в процессе исследования, Н.

На абразивные бруски наносили исследуемые составы ТСМ (толщина смазочного слоя 0,1 мм) и закрепляли их в динамометре УДМ-100. На шпиндель станка устанавливали диск из стали Р6М5 диаметром 250 и высотой 10 мм. Нормальную нагрузку  $P_y$  обеспечивали путем создания натяга в технологической системе величиной 0,03 мм. Температуру в зоне контакта трущихся объектов создавали с помощью плазматрона «Мультиплаз 3500» и контролировали с помощью бесконтактного лазерного пирометра «OptrisMSPlus».

Учитывая, что шлифование сопровождается съемом металла, в процессе исследования смазочной способности ТСМ по предлагаемой методике для повышения точности определения коэффициента трения контролировали наличие диспергирования в зоне трения абразивного бруска и металлического диска.

В ходе исследования процесса трения подбирали такие параметры взаимодействия контактирующих объектов, при которых процесс диспергирования был минимален. В дальнейшем наличие диспергирования контролировали путем измерения массы металлического диска в начале и конце опыта на лабораторных электронных весах ВК-3000. Весы соответствуют стандарту ГОСТ 24104-2001.

Составляющие силы шлифования контролировали с помощью универсального динамометра УДМ-100, подключенного к автоматизированному рабочему месту, созданному на базе АЦП La20-USB.

Значения коэффициентов трения, определенные для пары «абразивный брусок 25А F60 М 5 V А – диск из стали Р6М5», при использовании различных составов ТСМ (табл. 2.1) представлены на рис. 2.3.

Результаты исследований по изложенной выше методике представлены на рис. 2.3. Полученные результаты достаточно высоко коррелируются с данными других исследователей, в частности, с результатами, приведенными в работе [51]. В качестве примера на рис. 2.4. показана зависимость коэффициента трения от температуры, приведенная в работе [51]. Сравнение кривых на рис. 2.3 и 2.4, показывает, что характер зависимостей коэффициента трения от температуры имеет идентичный характер.

## Составы ТСМ

№ сос тав а	Обозн ачение состав а	Компоненты, % масс.						
		Связую щее	Наполнитель				Присадка	
			Высокодисперсный				Нанопорошо к	
		Парафин	Дисульфид молибдена	Графит	Диатомит	Голубая глина	меди	алюминия
1	Г2	60	–	–	–	40	–	–
2	Г5	60	–	15	–	25	–	–
3	Д1	60	–	–	40	–	–	–
4	Д4	60	–	15	25	–	–	–
5	М1	60	30	10	–	–	–	–
6	Г2М5	59,5	–	–	–	40	0,5	–
7	Г2А5	59,5	–	–	–	40	–	0,5
8	Д1М5	59,5	–	–	40	–	0,5	–
9	Д1А5	59,5	–	–	40	–	–	0,5
10	А*							

\*Состав А – производства НПО Алтай.

По результатам выполненного исследования можно заключить, что коэффициент трения испытанных ТСМ уменьшается с увеличением температуры в зоне контакте металлического диска и абразивного бруска. Введение в состав ТСМ высокодисперсных наполнителей (порошков голубой глины и диатомита, составы Г2 и Д1 соответственно) (см. рис. 2.3) оказало положительное влияние на величину коэффициента трения, который был на уровне коэффициента трения базового состава М1.

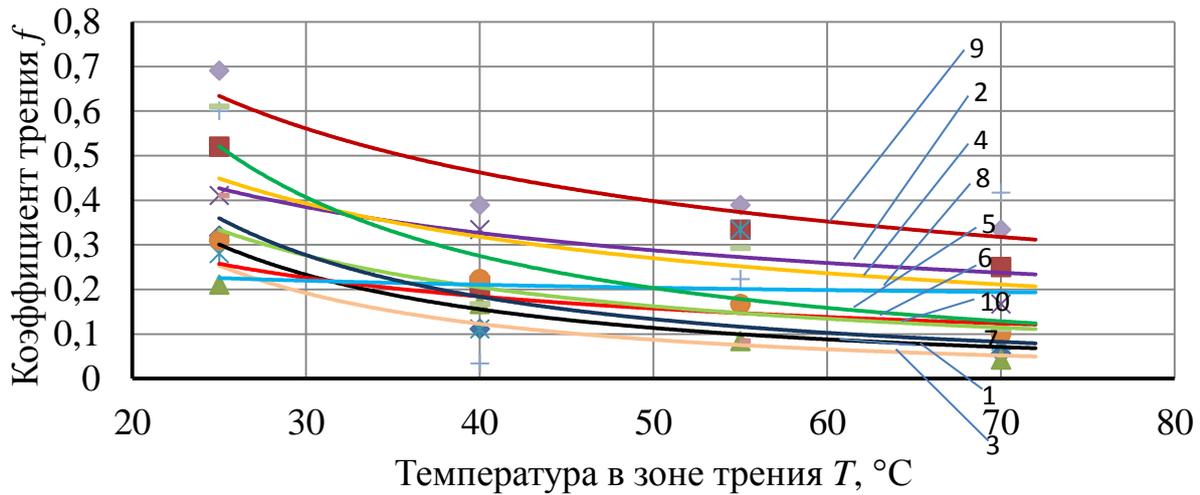


Рис. 2.3. Аппроксимированные зависимости коэффициента трения  $f$  от температуры в зоне трения  $T$  для пары трения «абразивный брусок 25А F60 М 5 V А – металлический диск из стали Р6М5» при применении различных составов ТСМ: 1 – 10 – составы ТСМ по табл. 2.1

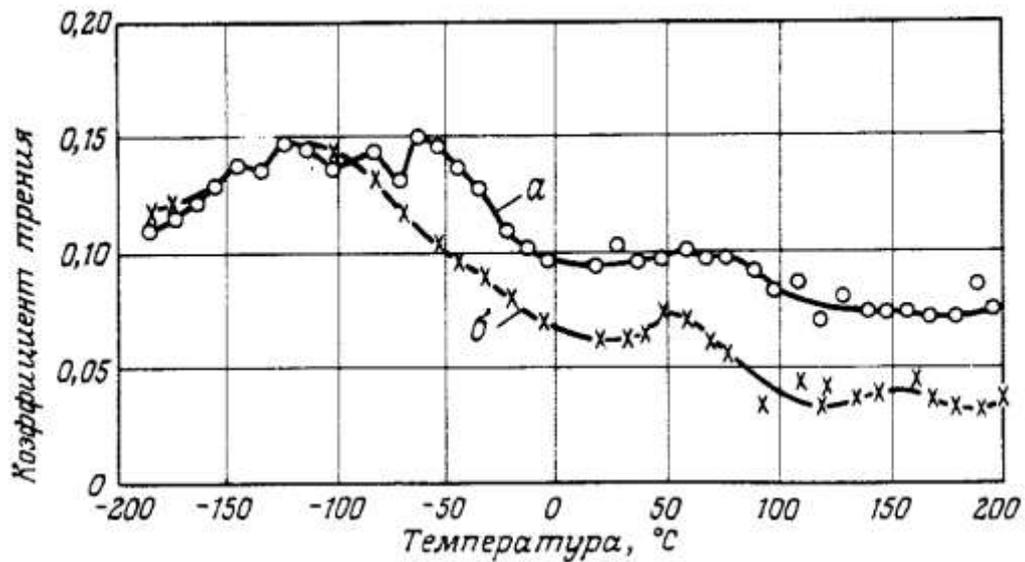


Рис. 2.4. Зависимость коэффициента трения от температуры [51]: а – 15% кокса + 5 %  $\text{MoS}_2$  + глинозем; б – 15 % кокса + 5 %  $\text{MoS}_2$

Для оценки возможности применения предлагаемой методики для ранжирования ТСМ по технологической эффективности на основе анализа их смазочного действия была проведена проверка наличия корреляционной связи между экспериментально определенными значениями коэффициента трения для пары «абразивный брусок 25А F60 М 5 V А – диск из стали Р6М5», тангенциальной составляющей силы шлифования  $P_z$  и средней контактной температурой  $T_k$  (табл. 2.2). Для определения тангенциальной составляющей силы шлифования и средней

контактной температуры шлифовали заготовки из стали Р6М5 с окружной скоростью круга  $V_k = 35$  м/с;  $V_{cm} = 15$  м/мин;  $S_{ep} = 0,01$  мм/дв. ход с применением тех же 10 составов ТСМ, что и при проведении исследования коэффициентов трения (см. табл. 2.1).

Таблица 2.2

Коэффициенты трения при температуре в зоне контакта  $80$  °С и средние контактные температуры в зоне шлифования кругом 1 300' 40' 76' 25А F46 Q 5 V А при применении десяти составов ТСМ, режим шлифования:  $V_{cm} = 15$  м/мин;  $S_{ep} = 0,01$  мм / дв. ход.

Составы ТСМ	Изменение массы металлического диска, г	Коэффициент трения	Тангенциальная составляющая силы шлифования $P_z$ , Н	Средняя контактная температура $T_k$ , °С
Д1	0,12	0,03	52,2	552
Г2	0,17	0,04	47	559
Г2А5	0,21	0,08	58,75	578
А	0,22	0,09	56,75	645
Д1М5	0,27	0,08	45,4	546
М	0,17	0,1	55,5	705
Г2М5	0,19	0,12	40,1	521
Д4	0,28	0,21	51,25	583
Г5	0,24	0,20	56,6	622
Д1А5	0,31	0,32	45,5	538

Для иллюстрации степени стохастической связи между тангенциальной составляющей силы шлифования  $P_z$ , средней контактной температурой  $T_k$  при шлифовании и коэффициентом трения, определенным по приведенной выше методике, построили диаграмму рассеивания, качественный анализ которой показал, что корреляционная связь между интересующими переменными отсутствует (рис. 2.5).

Расчет коэффициента парной корреляции  $r$  по формуле (2.2) также подтвердил отсутствие стохастической связи между переменными:

$$r_{TK} = \frac{m_{xy}}{S_x \cdot S_y} = 0,11, \quad r_{Pz} = -0,302 \quad (2.2)$$

где  $m_{xy}$  – эмпирический момент связи:  $m_{xy} = \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]$ ;  $S_x$  – эмпирическая дисперсия:  $S_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ;  $S_y$  – эмпирическая дисперсия:  $S_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ;  $x_i, y_i$  – текущие значения соответственно коэффициента трения и средней контактной температуры;  $\bar{x}, \bar{y}$  – средние арифметические значения соответственно коэффициента трения и средней контактной температуры.

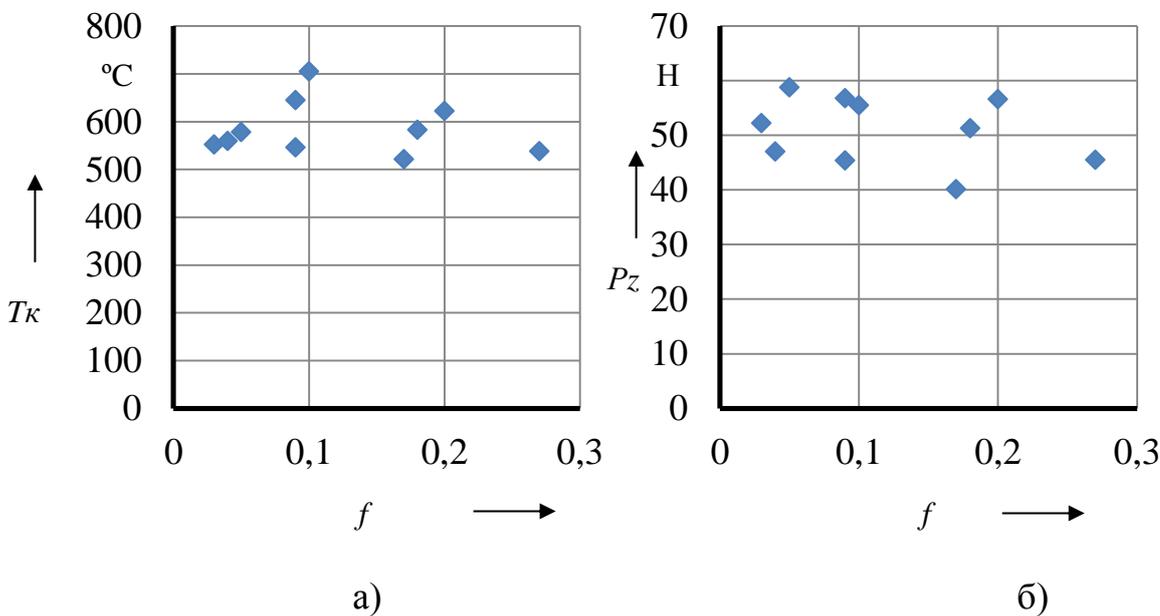


Рис. 2.5. Диаграммы рассеивания: а – средней контактной температуры и коэффициента трения; б – тангенциальной составляющей силы шлифования и коэффициента трения

Очевидно, отсутствие корреляции между коэффициентами трения при применении различных составов ТСМ, тангенциальной составляющей силы шлифования и средней контактной температурой обусловлено тем, что максимальная температура в зоне трения в процессе определения коэффициентов трения, не превышала 100 °С. В тоже время, средние контактные температуры при шлифовании достигают значений, на порядок превышающих значение температуры в зоне трения при проведении экспериментов по предлагаемой методике.

Таким образом, в силу отсутствия корреляции между силой трения и средней контактной температурой, а также ввиду сложности реализации условий процесса трения, идентичных условиям в зоне шлифования, объективно оценить

эффективность смазочного действия ТСМ не представляется возможным. Поэтому в дальнейшем оценку влияния ТСМ с наполнителями из высокодисперсных природных материалов и наноматериалов на эффективность плоского шлифования проводили на основе применения показателей, определяемых в процессе шлифования (параметры шероховатости шлифованной поверхности, средняя контактная температура и др.).

## 2.2. Оценка расхода ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками

Одним из немаловажных факторов, влияющих на эффективность процесса шлифования, является расход ТСМ. В диссертационной работе расход ТСМ определяли относительным методом на операции плоского шлифования периферией специально подготовленного круга. На половину высоты рабочей поверхности круга перед проведением исследований наносили исследуемый ТСМ, а другую оставляли чистой. Затем шлифовали специально подготовленные образцы (рис. 2.6) с двумя рядами отверстий диаметром 3 мм. Перед шлифованием в отверстия образца помещали цилиндрические вкладыши из фильтровальной бумаги [4].

В процессе шлифования этого образца часть ТСМ, находящегося на рабочей поверхности ШК, под действием теплоты, выделяющейся в зоне шлифования, переходит из твердого в жидкое агрегатное состояние и пропитывает вкладыши, размещенные в отверстиях образца (зона ТСМ на рис. 2.6). При этом вкладыши, размещенные в зоне без ТСМ, не пропитывались смазочным материалом (зона без ТСМ на рис. 2.7).

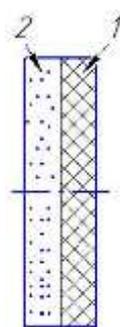


Рис. 2.6. Специальный шлифовальный круг для определения расхода ТСМ: 1 – зона с ТСМ; 2 – зона без ТСМ

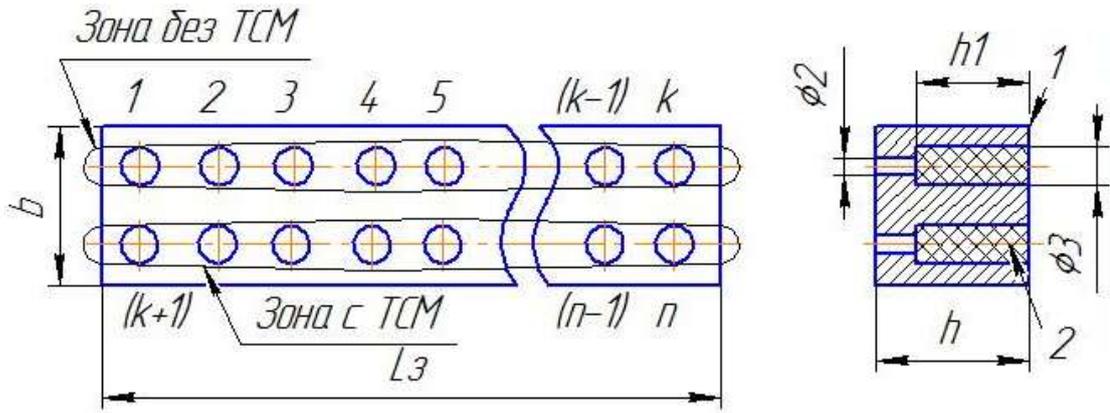


Рис. 2.7. Образец для определения расхода ТСМ [4]: 1 – образец; 2 – вкладыш

Для оценки расхода ТСМ вкладыши взвешивали до шлифования и сортировали таким образом, чтобы отклонения их массы не превышали 0,2 мг. Затем вкладыши устанавливали в отверстия образца, после шлифования которого вкладыши аккуратно извлекали из отверстий образца и вновь взвешивали. В результате получали две группы вкладышей: одна – из зоны шлифования без применения ТСМ с массами  $m_1, m_2, \dots, m_k$ , вторая – из зоны шлифования с применением ТСМ с массами  $m_{k+1}, m_{k+2}, \dots, m_n$ . Вычисляли массу ТСМ, пропитавшего вкладыш или налипшего на него, по формуле [4]:

$$\bar{m}_c = 2 \cdot \frac{\sum_{i=k+1}^n m_i - \sum_{i=1}^k m_i}{n-k} \quad (2.3)$$

Затем определяли удельный расход смазочного материала  $Q_c^{\cdot}$ ,  $\text{мг} \cdot \text{мм}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ , и расход смазочного материала в зоне контакта ШК и заготовки  $Q_c$ ,  $\text{мг} \cdot \text{мин}^{-1}$  [4]:

$$Q_c^{\cdot} = \frac{\bar{m}_c}{\pi \cdot d_0^2 \cdot \tau_{ш}}; \quad (2.4)$$

$$Q_c = Q_c^{\cdot} \cdot l_k \cdot b, \quad (2.5)$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия в образце, мм;  $l_k$  – длина дуги контакта круга и заготовки, мм. При плоском шлифовании периферией круга  $l_k = \sqrt{D_k \cdot t}$  (где  $t$  – глубина шлифования, мм);  $b$  – ширина шлифуемой поверхности заготовки, мм.

Массу слоя ТСМ  $m_n$ , нанесенного на рабочую поверхность ШК, рассчитали по зависимости:

$$m_n = \pi \cdot \rho_{тс} \cdot H_k \cdot D_k \cdot t_{тс}, \quad (2.6)$$

где  $t_{тс}$  – толщина смазочного слоя на рабочей поверхности ШК, мм (рис. 2.8).

$$H_{д.з.}^{max} < t_{тс} < H_{реж.}^{min},$$

где  $H_{рез}^{min}$  – минимальная величина выступания режущих абразивных зерен над связкой, мм;  $H_{рез}^{max}$  – максимальная величина выступания давящих абразивных зерен над связкой, мм.

С учетом формул (2.5) – (2.6) определяли период стойкости ТСМ:

$$t_{пс} = K_{тс} \cdot \frac{m_n}{Q_c}, \quad (2.7)$$

где  $K_{тс} = 0,7 - 0,9$  – коэффициент, учитывающий неполное расходование ТСМ за период его стойкости в процессе шлифования.

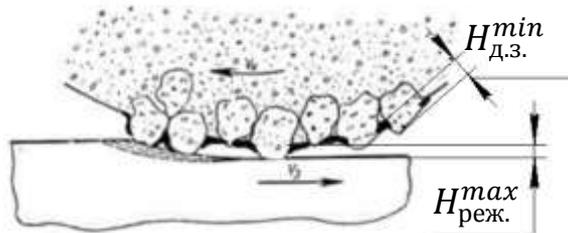


Рис. 2.8. Слой ТСМ на рабочей поверхности ШК

По изложенной выше методике исследовали расход десяти составов ТСМ при плоском шлифовании периферией круга образцов из сталей Р6М5, НРС 63 ... 65, кругом 1 300' 40' 76' 25А F46 Q 5 V А. Окружную скорость круга  $V_k$  принимали равной 35 м/с, скорость стола  $V_{ст}$  составляла 15 м/ мин, врезная подача  $S_{вр} = 0,03$  мм/дв.ход. Варьировали продолжительностью нанесения ТСМ. Массу нанесенного ТСМ определяли по зависимости:  $m_n = m_1 - m_2$ , где  $m_1$  – масса брикета ТСМ до нанесения, мг;  $m_2$  – масса брикета ТСМ после нанесения на рабочую поверхность ШК, мг.

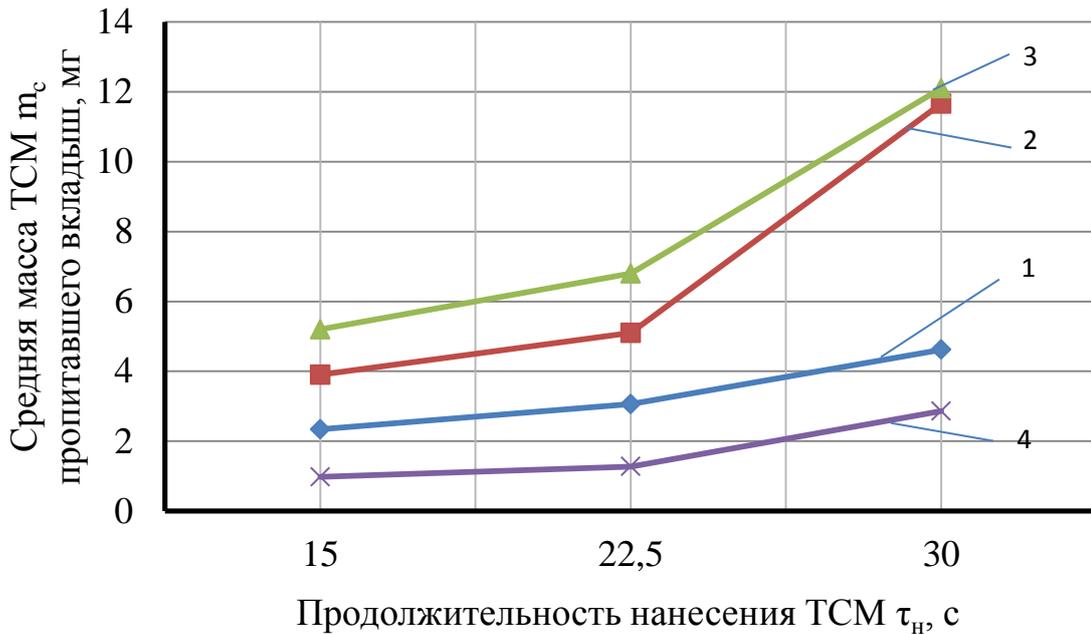


Рис. 2.9. Зависимость средней массы ТСМ, пропитавшего вкладыш, от продолжительности нанесения различных составов ТСМ: 1 – состав Г2; 2 – состав Д1; 3 – состав М1; 4 – состав А (см. табл. 2.1); материал заготовки - сталь Р6М5, HRC 63 ... 65; круг – 1 300' 40' 76'25А F46 Q 5 V А;  $S_{ep} = 0,03$  мм/дв. ход;  $V_{cm} = 15$  м / мин

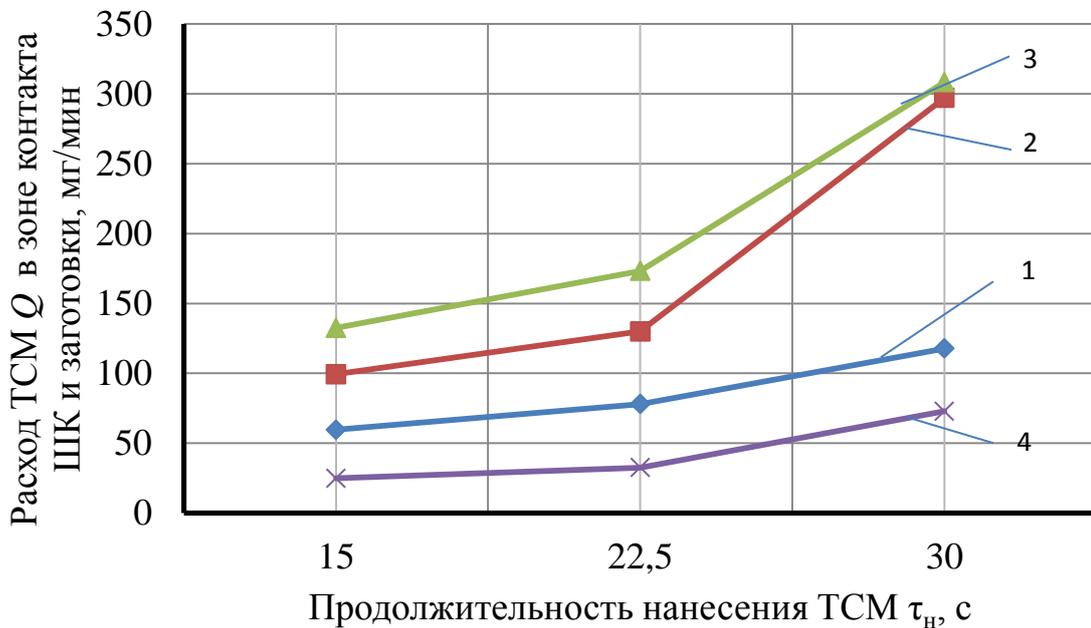


Рис. 2.10. Зависимость расхода ТСМ в зоне контакта ШК и заготовки от продолжительности нанесения для различных составов ТСМ: 1 – состав Г2; 2 – состав Д1; 3 – состав М1; 4 – состав А (см. табл. 2.1); материал заготовки – сталь Р6М5, HRC 63 ... 65; круг – 1 300' 40' 76'25А F46 Q 5 V А;  $S_{ep} = 0,03$  мм/дв. ход;  $V_{cm} = 15$  м / мин

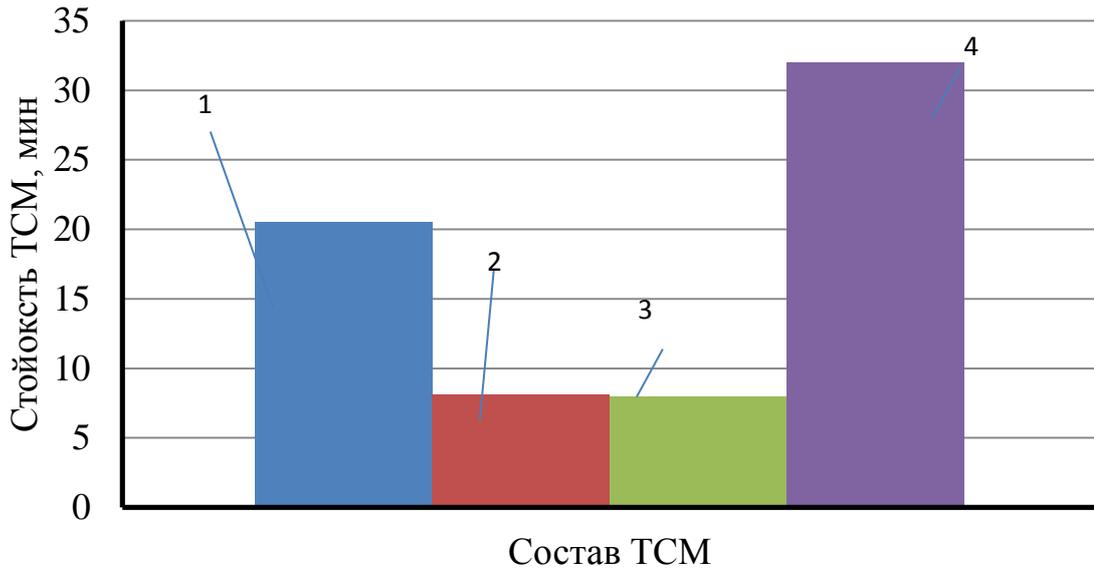


Рис. 2.11. Стойкость различных составов ТСМ, нанесенных на рабочую поверхность ШК: 1 – состав Г2; 2 – состав Д1; 3 – состав М1; 4 – состав А (см. табл. 2.1); материал заготовки - сталь Р6М5, HRC 63 ... 65; круг – 1 300' 40' 76'25А F46 Q 5 V A;  $S_{ep} = 0,03$  мм/дв. ход;  $V_{cm} = 15$  м / мин; продолжительность нанесения слоя ТСМ  $\tau_n = 30$  с

Из рис. 2.11 видно, что стойкость слоя ТСМ на рабочей поверхности ШК зависит от состава ТСМ. Наибольшая стойкость отмечена при применении состава Г2. В целом, период стойкости смазочного слоя составляет в зависимости от состава ТСМ от 8 до 30 минут.

### **2.3. Математическое моделирование шероховатости обработанной поверхности при плоском шлифовании периферией круга с применением твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками**

Как было показано в главе 1, на выбор конкретного состава ТСМ при проектировании операций шлифования оказывает его способность влиять на формирование шероховатости шлифованной поверхности. Эффективные составы ТСМ снижают шероховатость шлифованной поверхности через изменение смазочного, демпфирующего и диспергирующего действий.

Для прогнозирования высотных параметров шероховатости на операции шлифования с применением ТСМ важно иметь методику расчета этих параметров, учитывающую влияние режима обработки, материала обрабатываемой заготовки, характеристики шлифовального круга (ШК), состава и расхода ТСМ. В известных зависимостях для расчета высотных параметров шероховатости шлифованных поверхностей [23, 26 и др.] не учтено влияние состава и расхода ТСМ, нанесенного на рабочую поверхность ШК.

При разработке математической модели исходили из того, что шероховатость поверхности при шлифовании формируется режущим контуром круга при активном влиянии на этот процесс ТСМ, изменяющего в зоне обработки свое агрегатное состояние. При этом за основную характеристику рельефа круга, от которой непосредственно зависят высота и шаг микронеровностей шлифованной поверхности, принимали динамическую разновысотность активных (режущих и давящих) абразивных зерен (а.з.)  $H_{0д}$ , зависящую от динамической характеристики процесса шлифования, а также от статической разновысотности активных зерен  $H_{0ст}$ , соответствующей глубине залегания половины из всех выступающих над связкой зерен, измеренной от вершины наиболее выступающего абразивного зерна [23, 26].

Динамическая разновысотность активных а.з. равна согласно [97]:

$$H_{0д}(\tau) = e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0ст}}{\sigma_{СТ}} \sqrt{(1 + \beta)\sigma_{СТ}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot Ад(\tau)^2}, \quad (2.6)$$

где  $\sigma_{СТ}^2$  – дисперсия статистического распределения статической разновысотности активных зерен,  $\text{мм}^2$ ; определяется по формуле [22]:  $\sigma_{СТ}^2 = 0,2h_a^2$ ;  $h_a$  – толщина слоя абразива, снимаемого вершиной правящего инструмента при правке,  $\text{мм}$ ;  $H_{0ст}$  – статическая разновысотность зерен рабочей поверхности ШК, равна [26]:  $H_{0ст} = h_0 / \sqrt[k]{F(h_{СК})}$ ;  $h_0$  – расстояние уровня скалывания активных зерен от наиболее выступающих вершин зерен, соответствующее заданной вероятности,  $\text{мм}$ ;  $k$  – показатель степени;  $F(h_{СК})$  – функция распределения вершин зерен после правки круга;  $A_{ст}$  – амплитуда статических колебаний ШК,  $\text{мкм}$ ;  $Ад(\tau)$  – амплитуда динамических колебаний ШК,  $\text{мм}$ :

$$A_d(\tau) = \frac{j_c \cdot A_{CT} (\mu_0/\mu)^P e^{K_{COЖ} m_0 \tau}}{j_c + j_P}, \quad (2.7)$$

где  $j_c, j_P$  – жесткость технологической системы и системы резания соответственно, Н/мм, определяются по [20];  $\mu_0, \mu$  – вязкость эталонной и проверяемой СОЖ соответственно, Па · с;  $P$  – показатель степени, определяемый теоретически или экспериментально [20];  $\tau$  – время шлифования, с;  $m_0$  – показатель степени, характеризующий интенсивность роста амплитуды колебаний при шлифовании с эталонной СОЖ.

Однако, формула (2.7) не учитывает расход и переход в зоне шлифования СОТС из твердого в жидкое агрегатное состояние. Как показали исследования Е. С. Киселева [27], изменение расхода СОТС квазилинейно приводит к изменению шероховатости шлифованной поверхности. Поэтому при расчете динамической разновысотности активных а.з. на рабочей поверхности ШК следует учитывать не только изменение амплитуды во времени и влияние на неё ТСМ, но и его расход  $Q$ . В связи с этим, зависимость для расчета амплитуды динамических колебаний  $A_d$  будет иметь вид:

$$A_d(\tau, Q) = A_{CT} \cdot K_{ТСМ} \cdot \frac{j_c}{j_c + j_P} \cdot Q^\varepsilon \cdot \tau^\varphi, \quad (2.8)$$

где  $K_{ТСМ}$  – коэффициент, учитывающий влияние состава ТСМ на изменение амплитуды динамических колебаний (прил. Ц);  $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды динамических колебаний в зависимости от расхода ТСМ (прил. Ц);  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды динамических колебаний в зависимости от времени шлифования (приложение И).

С учетом выражения (2.6) математическую модель расчета среднего арифметического отклонения профиля шероховатости  $Ra$  запишем в виде:

$$Ra(\tau) = K_{З_1} \cdot R[H_{0d}(\tau)]^{f^1}; \quad (2.9)$$

где  $K_{З_1}$  – коэффициент, учитывающий влияние засаливания рабочей поверхности круга и связанных с этим явлений схватывания металла заготовки с налипшими на круг частицами стружки. Методика определения  $K_{З_1}$  дана в работе [25], можно принять  $K_{З_1} = 1,0$  при шлифовании заготовок из углеродистых и низколегированных сталей; при шлифовании заготовок из химически и

адгезионноактивных материалов  $K_{з_1} = 1,0$  в случае работы «острым» кругом. В других случаях –  $K_{з_1} = 1,1 \div 1,6$  (меньшие значения для чистовых режимов и при использовании высокоэффективных ТСМ);  $R$  – коэффициент, зависящий от характеристики, размеров и условий правки круга, от размеров заготовки, схемы и режима шлифования;  $f_l$  – показатель степени [23].

С учетом зависимостей (2.6) и (2.8), окончательно математическая модель среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  может быть записана в виде:

$$Ra(\tau, Q) = K_{з_1} \cdot R \left[ e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0CT}}{\sigma_{CT}} \sqrt{(1 + \beta)\sigma_{CT}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot Ad(\tau, Q)^2} \right]^{f_1}, \quad (2.10)$$

Для моделирования основного параметра шероховатости  $Ra$  поверхностей, шлифованных с применением ТСМ, разработана методика, в соответствии с которой при расчете  $Ra$  используют формулы (2.6) – (2.10), учитывающие влияние ТСМ на динамическую разновысотность активных зерен. Методика включает следующие этапы:

1. Определяют условную высоту микронеровностей шлифованной поверхности  $H_{ус}$  по зависимости изложенной в [23].
2. Вычисляют статическую разновысотность зерен, расположенных на рабочей поверхности невращающегося ШК по зависимости, изложенной в работе [23], в которой функция распределения вершин зерен после правки круга  $F(h_{ск})$ , определяется по формуле [23]:

$$F(h_{ск}) = \frac{\sqrt{h_a - \sqrt{x}}}{\sqrt{h_a}}, \quad (2.11)$$

где  $x$  – расстояние точек пространства до средней поверхности между неровностями поверхности и неровностями связки.

3. Рассчитывают дисперсию статического распределения активных зерен  $\sigma_{CT}^2$  по зависимости, приведенной в работе [23].
4. По методике [23] определяют жесткости технологической системы  $j_c$  и системы резания  $j_p$ .
5. Рассчитывают динамическую разновысотность активных зерен рабочей поверхности ШК по формуле (2.8).

6. Вычисляют среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  по формуле:

$$Ra(\tau) = K_{31} \cdot R[e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0CT}}{\sigma_{CT}} \sqrt{(1 + \beta)\sigma_{CT}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot (A_{CT} \cdot K_{TSM} \cdot \frac{j_c}{j_c + j_p} \cdot Q^\varepsilon \cdot \tau^\varphi)^2}]^{f1} \quad (2.12)$$

Методика расчета параметров шероховатости с учетом свойств ТСМ реализована на языке С++. Составлена программа расчета среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  (на данный программный продукт получены свидетельства о регистрации № 2014616620 и 2015616818, (приложение К). Программы позволяют рассчитать параметр  $Ra$  для широкого диапазона условий шлифования.

По разработанной программе на языке С++ выполнено моделирование шероховатости  $Ra$  при плоском шлифовании периферией круга заготовок из стали Р6М5 (HRC<sub>3</sub> 63 ... 65) с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

Моделирование среднего арифметического отклонения профиля шлифованной поверхности  $Ra$  с учетом свойств и расхода ТСМ проводили при следующих значениях параметров: шлифовальный круг: 1 300` 40` 76 25А F60 М 5 V А. Амплитуда статических колебаний ШК  $A_{cm} = 0,006$  мм (значение определено экспериментально для плоскошлифовального станка 3Е711ВФ2 в разделе 3), правящий инструмент: алмазный карандаш 3908-0083 С2 (ГОСТ 607). Режимы правки:  $S_{ep} = 0,03$  мм/ход;  $S_{non} = 5$  м/мин; амплитуда колебаний ШК в процессе правки  $A_{np} = 0,001$  мм (значение определено экспериментально для процесса правки круга 1 300` 40` 76 25А F60 М 7 V А). Режим обработки: окружная скорость круга  $V_k = 35$  м/с; скорость стола  $V_{cm} = 15$  м/мин; врезная подача  $S_{ep} = 0,01$  мм/дв. ход.

4. Составы ТСМ: Г2, Д1, М1, А (см. табл. 2.1). Станок 3Е711ВФ2: жесткость станка  $j_c = 100\ 000$  Н/мм. Материал заготовки: сталь Р6М5, HRC<sub>3</sub> 61 ... 64. Предел текучести материала обрабатываемой заготовки  $\sigma_T = 3030$  Н/мм<sup>2</sup>.

7. Поправочные коэффициенты:  $\beta = 0,15$ ;  $K_{31} = 1,1$ ;  $K = 2,7$ ;  $m = 1,14$ ;  $q = 0,5$ ;  $\alpha = 2$ ;  $K_{py} = 1$ ;  $Z_n = 1,8$ . Коэффициенты влияния ТСМ на амплитуду динамических колебаний ШК в процессе шлифования для различных составов ТСМ (прил. Т): Г2 –  $K_{TSM} = 6,5 \times 10^5$ ,  $\varepsilon = -0,471$ ,  $\varphi = 0,011$ ; Д1 –  $K_{TSM} = 1,223 \times 10^5$ ,  $\varepsilon = -$

0,578,  $\varphi = 0,07$ ; M1–  $K_{\text{TСМ}} = 8,5 \times 10^5$ ,  $\varepsilon = -0,319$ ,  $\varphi = 0,024$ ; A –  $K_{\text{TСМ}} = 4,77 \times 10^5$ ,  $\varepsilon = -0,372$ ,  $\varphi = 0,165$ .

Доказательство адекватности математической модели проводили путем сравнения расчетных и экспериментальных значений  $Ra$  шероховатости поверхностей (экспериментальные значения получали по методике, изложенной в главе 3 текущего диссертационного исследования), шлифованных с применением различных составов ТСМ (рис. 2.12 и 2.13). Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений показал, что отклонение не превышает 13 %, что свидетельствует о достаточно высокой адекватности разработанной математической модели (2.10).

По результатам численного моделирования шероховатости поверхностей, шлифованных с применением ТСМ, были получены значения среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$ , представленные на рис. 2.12 – 2.13. Как видно из результатов расчета, высотный параметр шероховатости  $Ra$  существенным образом зависит от режимов обработки, вида и содержания высокодисперсного наполнителя в ТСМ, от времени шлифования  $\tau_{\text{ш}}$  и нанесения ТСМ  $\tau_{\text{н}}$  на рабочую поверхность ШК.

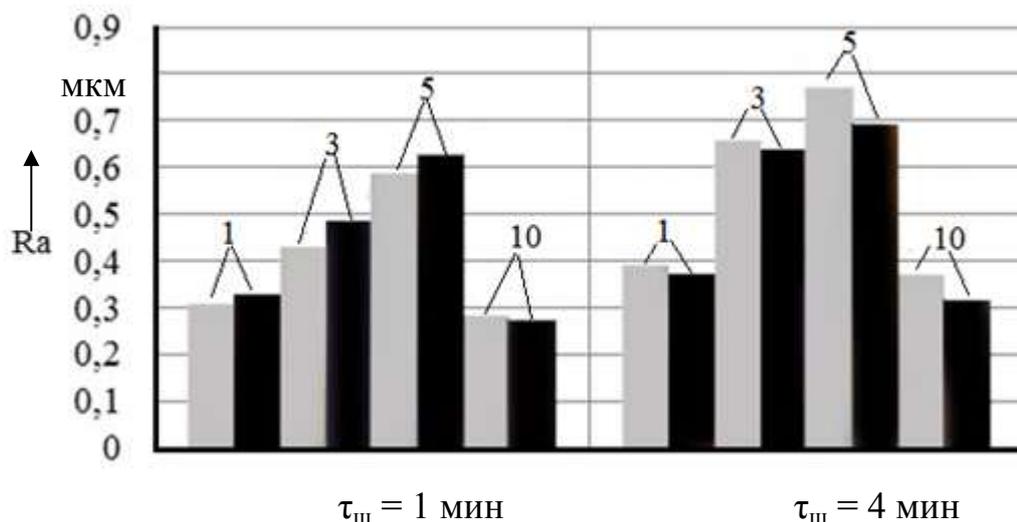


Рис. 2.12. Зависимость высотного параметра шероховатости  $Ra$  поверхности, шлифованной кругом 1 300` 40` 76 25A F60 M 7 V A, от состава ТСМ и продолжительности шлифования  $\tau_{\text{ш}}$ : 1, 3, 5, 10 – составы ТСМ по табл. 2.1;  $V_{\text{см}} = 15$  м/мин;  $V_{\text{к}} = 35$  м/с;  $S_{\text{сп}} = 0,01$  мм/дв. ход; ■ – расчетное значение  $Ra$ ; ■ – экспериментальное значение  $Ra$

Видно, что введение в состав ТСМ порошка голубой глины и диатомита благоприятно сказывается на шероховатости поверхности  $Ra$  по сравнению с базовым составом М1. По сравнению с базовым составом А, практически одинаковое значение  $Ra$  имеет состав Г2. Однако, данный состав выгоднее состава А по экономическим соображениям, в силу своей более низкой стоимости.

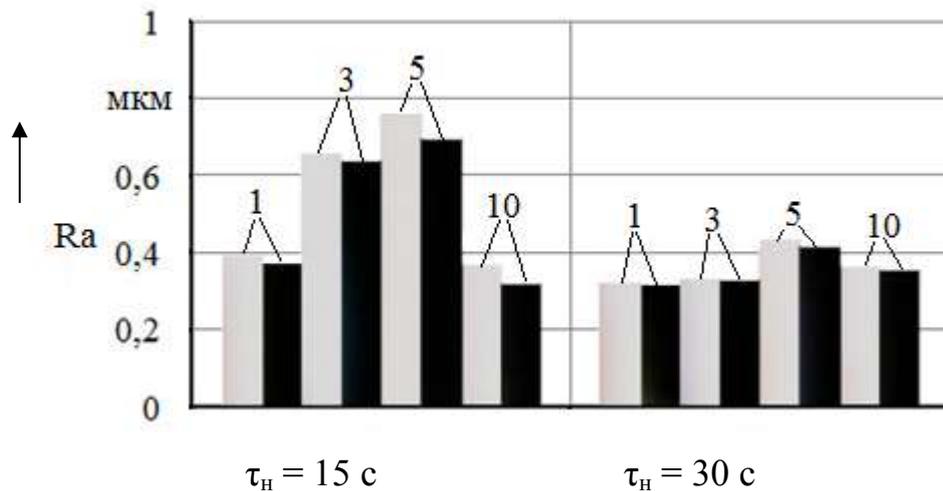


Рис. 2.13. Зависимость высотного параметра шероховатости  $Ra$  поверхности, шлифованной кругом 1 300` 40` 76` 25А F60 М 7 V А, от состава и продолжительности нанесения ТСМ на рабочую поверхность ШК  $\tau_n$ : 1, 3, 5, 10 – составы ТСМ по табл. 2.1;  $V_{cm} = 15$  м/мин;  $V_k = 35$  м/с;  $S_{gp} = 0,01$  мм/дв. ход;  $\tau_{ш} = 4$  мин; ■ – расчетное значение  $Ra$ ; ■ – экспериментальное значение  $Ra$

Из рис. 2.14 видно, что высотный параметр шероховатости  $Ra$  растет с увеличением времени шлифования  $\tau_{ш}$ . Это обусловлено двумя факторами. В первую очередь, увеличение  $\tau_{ш}$  приводит к увеличению расхода ТСМ и уменьшению его количества на рабочей поверхности ШК, что в свою очередь приводит к увеличению амплитуды динамических колебаний. Вторая причина – неравномерный износ ШК, увеличение которого, также зависит от количества ТСМ на его рабочей поверхности.

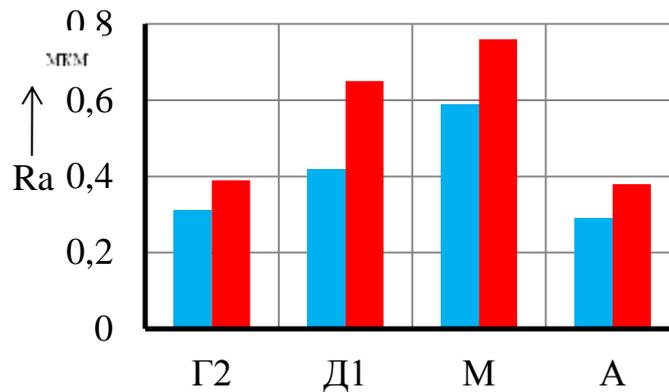


Рис. 2.14. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля поверхности  $Ra$ , шлифованной кругом 1 300` 40` 76` 25А F60 М 7 V А, от состава ТСМ и продолжительности шлифования  $\tau_{ш}$ : Г2 – А – составы ТСМ по табл. 2.1;  $V_{cm} = 15$  м/мин;  $V_k = 35$  м/с;  $S_{ep} = 0,01$  мм/дв. ход; продолжительность шлифования  $\tau_{ш}$ : ■ – 1 мин; ■ – 4 мин.

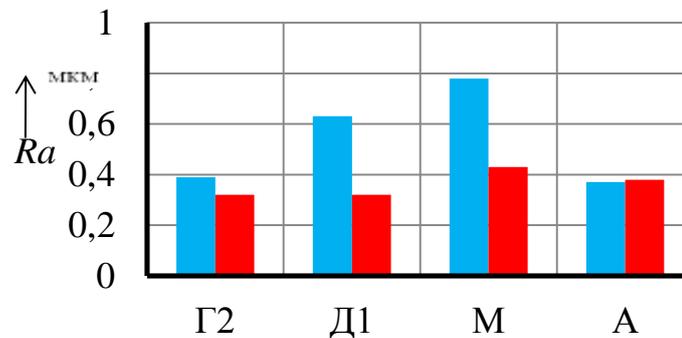


Рис. 2.15. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  поверхности, шлифованной кругом 1300` 40` 76` 25А F60 М 5 V А, от состава ТСМ и времени нанесения ТСМ  $\tau_n$ : Г2 – А – составы ТСМ по табл. 2.1;  $V_{cm} = 15$  м/мин;  $V_k = 35$  м/с;  $S_{ep} = 0,01$  мм/дв. ход; время нанесения ТСМ  $\tau_n$ : ■ – 15 с.; ■ – 30 с.

Это наглядно видно из рис. 2.15, где увеличение массы ТСМ на рабочей поверхности ШК приводит к снижению параметра шероховатости  $Ra$  шлифованных поверхностей.

## 2.4. Математическое моделирование теплообмена при плоском шлифовании периферией круга с применением твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками

### 2.4.1. Моделирование теплового состояния системы «шлифовальный круг - заготовка» при использовании ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками

Для достижения поставленной в главе 1 цели исследования необходимо, в частности, определить уровень температур в поверхностном слое обрабатываемой

заготовки, а также его зависимость от состава ТСМ. При этом следует учесть влияние материала ШК, режима обработки, которые влияют на теплонапряженность процесса шлифования.

При анализе теплового взаимодействия ШК и заготовки при плоском шлифовании приняли, что температурное поле двумерное ( $T = f(z, x)$ ), так как температурные поля во всех сечениях заготовки, кроме граничных, одинаковы. Учитывая непостоянство условий распределения теплоты в обрабатываемой заготовке в течение цикла шлифования, приняли, что температурное поле нестационарное ( $\frac{dT}{dt} \neq 0$ ) [52].

Характеристику и окружную скорость ШК учли в граничном условии второго рода через плотность теплового потока, а саму зону шлифования представили в виде полосового источника теплоты, ширина которого равна длине дуги контакта  $L_k$ , перемещающегося со скоростью стола  $V_{cm}$  (рис 2.16).

Геометрическое описание объекта свели к заданию его формы и размеров [50]. При выбранной нами двумерной схеме заготовку представили в виде прямоугольника со сторонами  $Z$  и  $X$ .

Приняли, что теплота распространяется только вглубь заготовки. При выборе типа движения теплового источника воспользовались критерием Пекле (Peclet):

$$Pe = \frac{V_{cm} \cdot L_k}{a_T}, \quad (2.13)$$

Критерий  $Pe$  показывает, как соотносятся скорости перемещения теплового источника и распространения теплоты в заготовке. Расчет показал, что, например, при шлифовании заготовок из стали Р6М5 (при  $T = 650^\circ\text{C}$ ;  $V_{cm} = 15$  м/мин = 0,25 м/с;  $L_k = 0,00189$  м;  $a_T = 3,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с)  $Pe = 131,25$ . Следовательно, источник быстродвижущийся, и сделанное выше допущение оправдано.

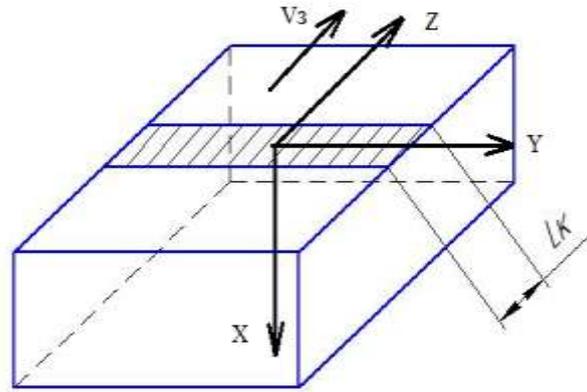


Рис. 2.16. Схема источника тепловыделения при плоском шлифовании

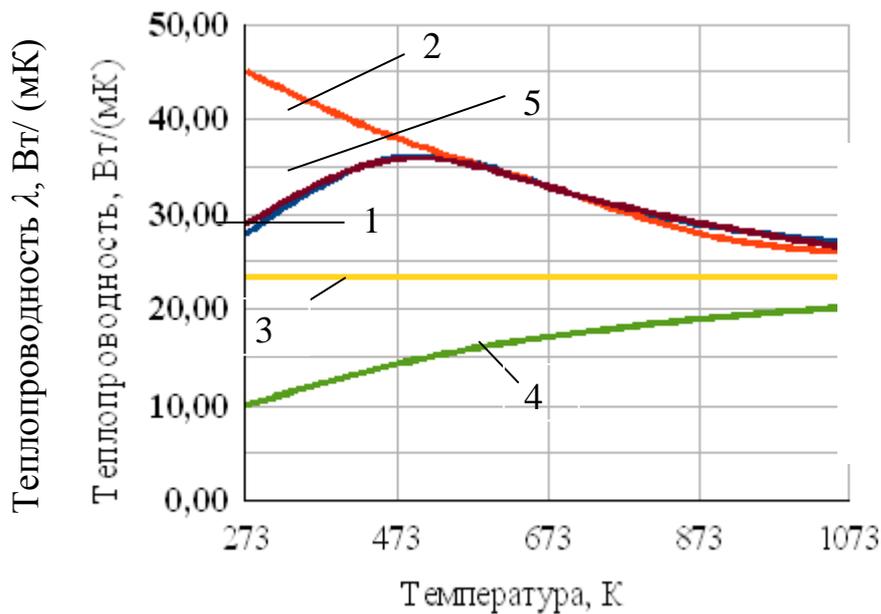


Рис. 2.17. Аппроксимация зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры  $T$  для сталей [18]: 1 – 40X; 2 – У10; 3 – Р6М5; 4 – 12Х18Н9Т; 5 – 30ХГСА

Основное уравнение теплопроводности для рассматриваемой системы применительно к нестационарному двумерному температурному полю в обрабатываемой заготовке в неподвижной относительно заготовки системе координат имеет вид [18, 21]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T(T) \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (2.14)$$

где  $T$  - текущее значение температуры в заготовке, К;  $a_T$  - коэффициент температуропроводности материала заготовки,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $x, z$  - координаты заготовки, м.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (2.14) описывает изменение температуры в любой точке заготовки, не находящейся на её поверхности, т.е. при выполнении условий:

$$0 \leq z \leq Z; 0 \leq x \leq X, \quad (2.15)$$

где  $Z, X$  – максимальные координаты шлифуемого участка.

Уравнение (2.14) имеет единственное решение, если оговорить соответствующие начальные и граничные условия.

Начальное условие определяет распределение температур в заготовке в момент времени  $\tau = 0$ , принятый за начало отсчета [18, 21]. Температура компонентов технологической системы в начальный момент времени в рассматриваемом случае может быть принята равной температуре окружающей среды  $T_0$  [18, 52].

В этом случае начальное условие описывается выражением [48, 49]:

$$\tau = 0; T(z, x, \tau) = T_0, \quad (2.16)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, К.

Граничное условие второго рода представили в виде:

$$-q_2(\tau) = \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.17)$$

где  $q_2(\tau) = \text{const}$  – плотность теплового потока, поступающего в заготовку на этапе съема основной части припуска, Вт/м<sup>2</sup>.

Граничное условие на наружной поверхности ШК, контактирующей с окружающим воздухом, представим в виде:

$$-\lambda_{\text{к}} \left( \frac{dT_{\text{к}}}{dr_{\text{к}}} \right) = \alpha_{\text{вк}} (T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}), \quad (2.18)$$

где  $\alpha_{\text{вк}}$  – коэффициент теплопередачи от поверхности ШК окружающему воздуху, Вт / (м<sup>2</sup> · К).

Граничное условие на поверхности заготовки, контактирующей с окружающим воздухом, имело следующий вид:

$$-\lambda_3 \left( \frac{dT_3}{dx} \right) = \alpha_{\text{рас}} (T_3 - T_{\text{в}}): x = h, \quad (2.19)$$

где  $\alpha_{\text{рас}}$  – коэффициент теплопередачи воздуха при его контакте с нагретой поверхностью заготовки, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Из бесчисленного множества возможных явлений, описываемых уравнением (2.13), граничными условиями выделили описание теплообмена между поверхностями круга, заготовки и ТСМ, а также с окружающим воздухом и элементами технологической оснастки.

В пределах зоны контакта круга и заготовки:

$$T_k = T_z = T_{кр.}$$

$$\frac{P_z(V_k + V_{ст})}{S} = \lambda_k \left( \frac{dT_k}{dr} \right) + \lambda_z \left( \frac{dT_z}{dx} \right) + Q_{ТСМ} + Q_{стр}, \quad (2.20)$$

где  $P_z$  – касательная составляющая силы шлифования, Н;  $V_k$  – окружная скорость круга, м/с;  $S$  – фактическая площадь контакта ШК с заготовкой, м<sup>2</sup>;  $R_k$  – радиус наружной окружности ШК, м;  $V_{ст}$  – скорость стола, м/мин;  $T_{кр.}$  – температура ШК, °К;  $T_z$  – температура заготовки, °К;  $Q_{ТСМ}$  – поверхностная плотность теплового потока, поступающего в ТСМ, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{стр}$  – поверхностная плотность теплового потока, поступающего в стружку, Вт/м<sup>2</sup>.

Поверхностную плотность теплового потока, поступающего в стружку, определили по выражению:

$$Q_{стр} = c_z \cdot m_{ст} \cdot (T_k - T_{зн}) / S \cdot \tau, \quad (2.31)$$

где  $c_z$  – теплоемкость материала обрабатываемой заготовки Дж/(кг · °К);  $T_{зн}$  – начальная температура заготовки, принимаем  $T_{зн} = 293$  °К;  $T_k$  – средняя контактная температура в зоне обработки, °К;  $\tau$  – время действия теплового источника на длине дуги контакта  $L_k$ , с;  $m_{ст}$  – масса стружки при шлифовании элементарного участка поверхности заготовки длиной  $L_k$ , кг.

$m_{стр}$  вычислили по формуле:

$$m_{стр} = \rho_z \cdot L_k \cdot S_{вр} \cdot H_k, \quad (2.22)$$

где  $\rho_z$  – плотность материала обрабатываемой заготовки кг/м<sup>3</sup>;  $S_{вр}$  – врезная подача, мм/ход.

Поверхностная плотность теплового потока, поступающего в ТСМ,

$$Q_{ТСМ} = Q_{св} + Q_{нан}, \quad (2.23)$$

где  $Q_{св}$  – поверхностная плотность теплового потока, затрачиваемого на плавление связующего, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{нан}$  – поверхностная плотность теплового потока, затрачиваемого на нагрев наполнителя, Дж.

$$Q_{св} = (c_{св} \cdot m_{св} \cdot (T_{плав} - T_{нач}) + m_{св} q_c) / S \cdot \tau, \quad (2.24)$$

где  $c_{св}$  – теплоемкость связующего, Дж/(кг · °К);  $T_{нач}$  – начальная температура ТСМ, К;  $T_{плав}$  – температура плавления связующего, °К;  $m_{св}$  – масса ТСМ, расплавившегося при шлифовании элементарного участка длиной  $L_k$ , кг;  $q_c$  – удельная теплота плавления, Дж/кг.

$$Q_{нан} = c_{нан} \cdot m_{нан} \cdot (T_k - T_{нач}), \quad (2.25)$$

где  $c_{нан}$  – теплоемкость наполнителя, Дж/(кг · °К);  $T_{нач}$  – начальная температура ТСМ, °К;  $T_k$  – температура в зоне контакта ШК и заготовки, °К;  $m_{нан}$  – масса

наполнителя ТСМ, нагретого при шлифовании элементарного участка длиной  $L_K$ , кг.

$m_{св}$  нашли по выражению:

$$m_{св} = \frac{\rho_{св} \cdot L_K \cdot S_{вр} \cdot 2 \cdot c_c \cdot (T_{пл} - T_{ос}) \cdot \sqrt{\frac{a_c \cdot L_K}{\pi \cdot V_K}}}{q_c + c_c \cdot (T_{пл} - T_{ос})}, \quad (2.26)$$

где  $a_c$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $T_{ос}$  – температура окружающей среды, °К.

Поверхностная плотность теплового потока, поступающего в заготовку,

$$Q_3 = \psi \cdot Q_\Sigma, \quad (2.27)$$

где  $\psi$  – коэффициент, показывающий, какая доля теплоты, выделившейся в контактной зоне, поступает в заготовку [20]:

$$\psi = \frac{1}{1,25 + \frac{\lambda}{\lambda_k} \cdot \sqrt{\frac{a_T}{L_k \cdot V_k}}}, \quad (2.28)$$

где  $\lambda_k$  – теплопроводность ШК, Вт/(мК);  $\lambda$  – теплопроводность заготовки, Вт/(м·°С).

Учитывая сложность решения рассматриваемой тепловой задачи (п. 2.4.1) аналитическим путем [48, 50], проанализировали возможность её численного решения путем компьютерного моделирования. Математическая постановка тепловой задачи для рассматриваемого случая применительно к двумерному нестационарному полю приведена в п. 2.4.1. Дифференциальные уравнения записаны в неподвижной системе (относительно точки контакта) координат. При разработке компьютерной модели рассматриваемой задачи теплопроводности воспроизвели начальные и граничные условия, приведенные в п. 2.4.1.

#### **2.4.2. Методика численного решения уравнения теплопроводности для процесса плоского шлифования при применении ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками**

Из численных методов решения задач теплопроводности в настоящее время метод конечных элементов является наиболее надежным и обеспечивающим высокую точность полученных результатов методов расчета. Метод конечных

элементов основан на аппроксимации любой непрерывной величины (температуры, давления, перемещения) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей [18].

Для проведения компьютерного моделирования задали ряд параметров:

- геометрически описали рассматриваемые объекты (в нашем случае обрабатываемую заготовку);
- построили на заготовке сетку, определяющую количество участвующих в расчете конечных элементов и, тем самым, задали точность рассчитываемых температур;
- задали теплофизические характеристики контактирующих объектов (плотность, теплопроводность, удельную теплоемкость) и их зависимости от температуры;
- задали граничные условия, учитывающие взаимодействие контактирующих объектов.

Ответственной задачей при разработке стратегии компьютерного моделирования является выбор числа и размеров конечных элементов. Известно [18], что наиболее динамичные и опасные с точки зрения появления термических дефектов процессы протекают в слоях заготовки, непосредственно прилегающих к обрабатываемой поверхности (на глубине до 0,2 мм). Поэтому шаг сетки  $N$  задали неравномерный, постепенно увеличивающийся по направлению от поверхности в глубь заготовки (рис 2.18 – 2.19, табл. 2.3). Это позволило резко сократить время, затрачиваемое компьютером на выполнение теплового расчета.

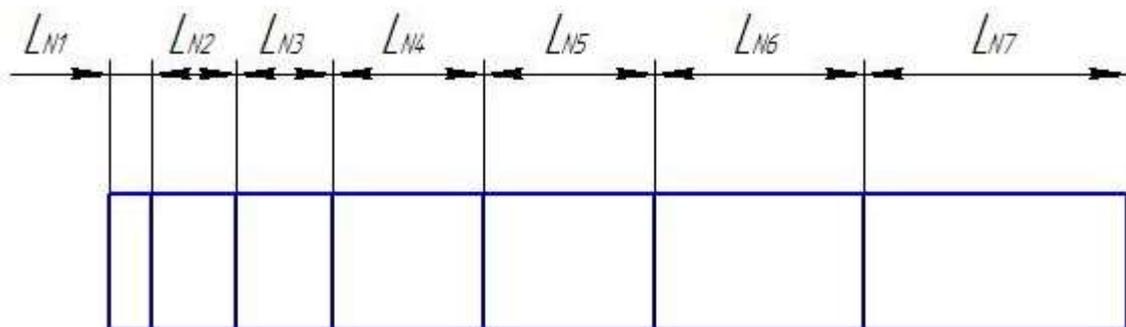


Рис. 2.18. Переменный шаг сетки конечных элементов для расчета температурных полей в заготовке в среде ANSYS

Значения шага сетки конечных элементов в зависимости от расстояния от поверхности заготовки

№ шага	Обозначение	Длина участка с одинаковым шагом сетки, мм	Шаг сетки N, мм
1	2	3	4
1	$L_{N1}$	0,10	0,010
2	$L_{N2}$	0,25	0,015
3	$L_{N3}$	0,50	0,025
4	$L_{N4}$	1,00	0,050
5	$L_{N5}$	2,00	0,100
6	$L_{N6}$	6,00	0,250
7	$L_{N7}$	25,00	0,500

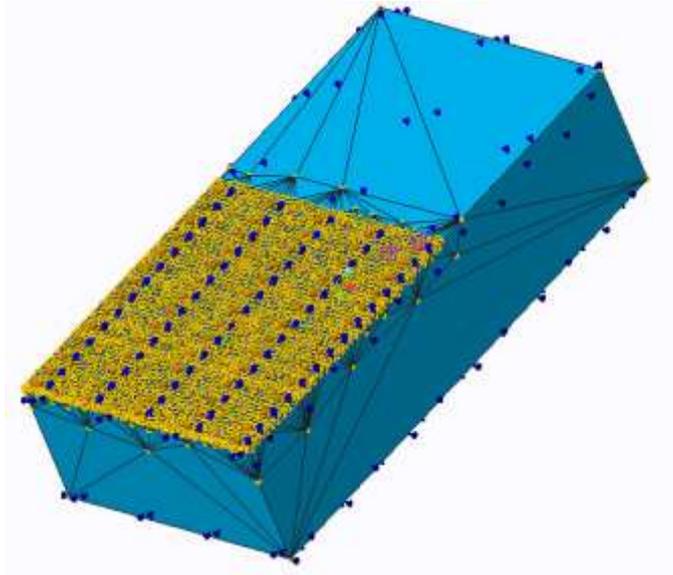


Рис. 2.19. Модель исследуемой заготовки с наложенной на ней сеткой конечных элементов

Теплофизические характеристики рассматриваемого объекта при компьютерном моделировании в среде ANSYS задают несколькими способами, наиболее удобным из которых является табличный. В интересующем нас интервале температур с определенным шагом задали значения плотности  $\rho$ , теплопроводности  $\lambda$  и удельной теплоемкости  $c$ , по которым программа автоматически построила непрерывную зависимость, используемую ею для расчета. Для материалов

обрабатываемых заготовок зависимости этих характеристик от температуры известны [18, 52].

Приложение тепловых нагрузок – наиболее важный и сложный подготовительный этап при программировании в пакете ANSYS. Поскольку при выбранной системе координат заготовка неподвижна в пространстве, а движется источник теплоты, последовательно задали положения источника теплоты, учитывая скорость его перемещения по поверхности заготовки, а также изменение его интенсивности во времени. С учетом исследований А. Ш. Хусаинова [53], для встречного шлифования приняли равномерное распределение мощности теплового источника.

### 2.4.3. Численное решение уравнения теплопроводности

Численное решение компьютерной модели, описанной в пункте 2.4.2, позволило получить описание теплового состояния заготовки в широком диапазоне условий шлифования, что позволило эффективно управлять тепловыми процессами и тем самым добиться максимальной эффективности от применения TCM.

Адекватность результатов компьютерного моделирования в среде ANSYS реальным условиям плоского шлифования периферией круга с применением TCM с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками проверяли путем сравнения результатов расчета  $T_k$  в среде ANSYS с данными натурального эксперимента. Эксперименты выполняли на стенде, созданном на базе плоскошлифовального станка мод. 3E711BФ2, оснащенного аппаратурой и прибором для измерения  $T_k$  методом полуискусственной термопары. Шлифовали заготовки 10 x 20 x 20 мм из стали P6M5, HRC 63 ... 65 кругом 1 300' 40' 76 25A F60 M 5 V A (теплофизические характеристики приведены в табл. 2.4). При численном расчете варьировали факторами, оказывающими влияние на  $T_k$  при плоском маятниковом шлифовании периферией круга: врезной подачей  $S_{ep}$  в диапазоне 0,01 ... 0,03 мм/дв.ход; скоростью стола  $V_{cm}$  в диапазоне 5 ... 15 м/мин; составами TCM (см. табл. 2.1). Теплофизические характеристики выбранных составов TCM приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.4

## Теплофизические характеристики стали Р6М5

Плотность $\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления $T_{пл}$ , К	Теплопроводность $\lambda_c$ , Вт/(мК)	Удельная теплоемкость $c_c$ , Дж/(кгК)	Коэффициент температуропроводности $a_c \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
8200	1573	32	0,44	4,42

Таблица 2.5

## Теплофизические характеристики компонентов ТСМ [55]

Компоненты ТСМ	Плотность $\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления $T_{пл}$ , К	Теплопроводность $\lambda_c$ , Вт/(мК)	Удельная теплоемкость $c_c$ , Дж/(кгК)	Удельная теплота плавления $q_c$ , Дж/кг	Коэффициент температуропроводности $a_c \times 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с
1	2	3	4	5	6	7
Парафин	920	325	0,27	2100	150000	139,85
Графит	2150	3773	79,50	700		53,00
Дисульфид молибдена	4800	4580	124,00	250	184000	103,00

Окончание табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
Порошок голубой глины	1845	1773	1,04	1090	-	0,516
Порошок диатомита	550	1073	0,11	900	-	0,500
Нанопорошок меди	8708	1358	369,70	425	-	99,7
Нанопорошок алюминия	2626	933	224,40	1090	-	78,4

Значения касательной составляющей силы шлифования  $P_z$  при расчете  $T_k$  определяли либо по регрессионным зависимостям (приложение Д), либо из экспериментальных данных (табл. 2.6).

Таблица 2.6  
Экспериментальные значения составляющих силы шлифования  $P_z$  и  $P_y$

Номер опыта	$S_{ep}$ , мм/дв. ход	$V_{cm}$ , м/мин	Состав ТСМ	$P_z$ , Н	$P_y$ , Н
1	2	3	4	5	6
1	0,01	5	Г2	36,8	49
2	0,03	5	Г2	45,3	53
3	0,01	15	Г2	47	67,5
4	0,03	15	Г2	51,5	84,3
5	0,01	5	Г5	43,5	55
6	0,03	5	Г5	51,3	63,8
7	0,01	15	Г5	56,6	75,5
8	0,03	15	Г5	67,5	87
9	0,01	5	Д1	42,2	68
10	0,03	5	Д1	49,6	75,3
11	0,01	15	Д1	52,2	88,5
12	0,03	15	Д1	61,6	107
13	0,01	5	Д4	38,5	47,8
14	0,03	5	Д4	46,5	54

Окончание табл. 2.6

1	2	3	4	5	6
15	0,01	15	Д4	51,3	64,5
16	0,03	15	Д4	62	94,3
17	0,01	5	М1	49,8	54,5
18	0,03	5	М1	52,5	59,5
19	0,01	15	М1	55,5	64,3
20	0,03	15	М1	61,5	70,3
21	0,01	5	А	49,8	53
22	0,03	5	А	53,8	57
23	0,01	15	А	56,8	66,8
24	0,03	15	А	69,3	87
25	0,01	5	Г2А5	46,8	54,5
26	0,03	5	Г2А5	57,3	67
27	0,01	15	Г2А5	58,8	79
28	0,03	15	Г2А5	62	82,8
29	0,01	5	Г2М5	31,7	68,5
30	0,03	5	Г2М5	32,8	73,8
31	0,01	15	Г2М5	40,1	77,5
32	0,03	15	Г2М5	44,5	102,3
33	0,01	5	Д1А5	31,5	57
34	0,03	5	Д1А5	32,3	75,8
35	0,01	15	Д1А5	45,5	78,8
36	0,03	15	Д1А5	59,5	83,5
37	0,01	5	Д1М5	36,6	56
38	0,03	5	Д1М5	39,4	67,5
39	0,01	15	Д1М5	45,4	73,5
40	0,03	15	Д1М5	49,6	90,3

По результатам компьютерного моделирования теплового состояния при указанных выше условиях шлифования получены распределения температурных полей в заготовке (рис. 2.20, приложение Б), а также значения средних контактных температур в зоне шлифования для испытанных составов ТСМ и режимов обработки (табл. 2.7, рис. 2.21 – 2.22).

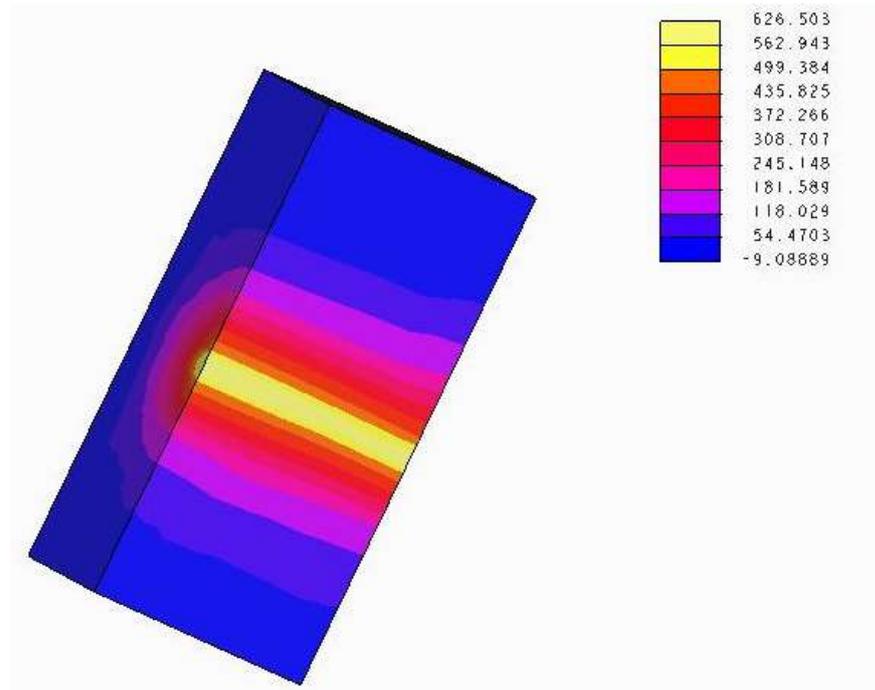


Рис. 2.20. Результаты моделирования температурных полей в заготовке, шлифованной кругом 1 300' 40' 76' 25A F46 Q 5 V A, в решателе ANSYS:  $V_k = 35$  м/с;  $S_{ер} = 0,03$  мм/дв.ход;  $V_{см} = 15$  м/мин; состав ТСМ - Г2 (табл. 2.1)

Таблица 2.7

Результаты моделирования температурных полей заготовок, шлифованных с применением ТСМ кругом КЗ

№	Состав ТСМ (см .табл. 2.1)	$V_{CT}$ , м/мин	$S_{ер}$ , мм/дв. ход	$T_{э.}$ °C	$T_{р.}$ , °C	Погрешность, %
1	2	3	4	5	6	7
1	Г2	5	0,01	512	442	13,7
2	Г2	5	0,03	522	549,8	5,3
3	Г2	15	0,01	559	567,3	1,5
4	Г2	15	0,03	577	626,5	8,6
5	Г5	5	0,01	584	524,5	10,2
6	Г5	5	0,03	604	623,4	3,2
7	Г5	15	0,01	622	683	9,8
8	Г5	15	0,03	645	821,3	27,3
9	Д1	5	0,01	452	508,6	12,5
10	Д1	5	0,03	493	603,2	22,4
11	Д1	15	0,01	552	630,7	14,3
12	Д1	15	0,03	639	749,7	17,3

1	2	3	4	5	6	7
13	Д4	5	0,01	516	463,3	10,2
14	Д4	5	0,03	549	565,2	3,0
15	Д4	15	0,01	583	619,1	6,2
16	Д4	15	0,03	701	754,6	7,6
17	М1	5	0,01	607	600,8	1,0
18	М1	5	0,03	677	638,7	5,7
19	М1	15	0,01	705	670,8	4,9
20	М1	15	0,03	813	748,5	7,9
21	А	5	0,01	586	600,8	5,8
22	А	5	0,03	617	654	6,0
23	А	15	0,01	645	686	6,4
24	А	15	0,03	703	674,1	4,1
25	Г2А5	5	0,01	521	564,2	8,3
26	Г2А5	5	0,03	563	696,7	23,7
27	Г2А5	15	0,01	578	710,3	22,9
28	Г2А5	15	0,03	636	754,6	18,6
29	Г2М5	5	0,01	373	380	1,9
30	Г2М5	5	0,03	469	397,4	15,3
31	Г2М5	15	0,01	521	483,7	7,2
32	Г2М5	15	0,03	553	540,7	2,2
33	Д1А5	5	0,01	348	377,4	8,4
34	Д1А5	5	0,03	445	414,5	6,9
35	Д1А5	15	0,01	538	548,9	2,0
36	Д1А5	15	0,03	593	724,2	22,1
37	Д1М5	5	0,01	445	440	1,1
38	Д1М5	5	0,03	481	478	0,6
39	Д1М5	15	0,01	546	547,7	0,3
40	Д1М5	15	0,03	629	603,2	4,1

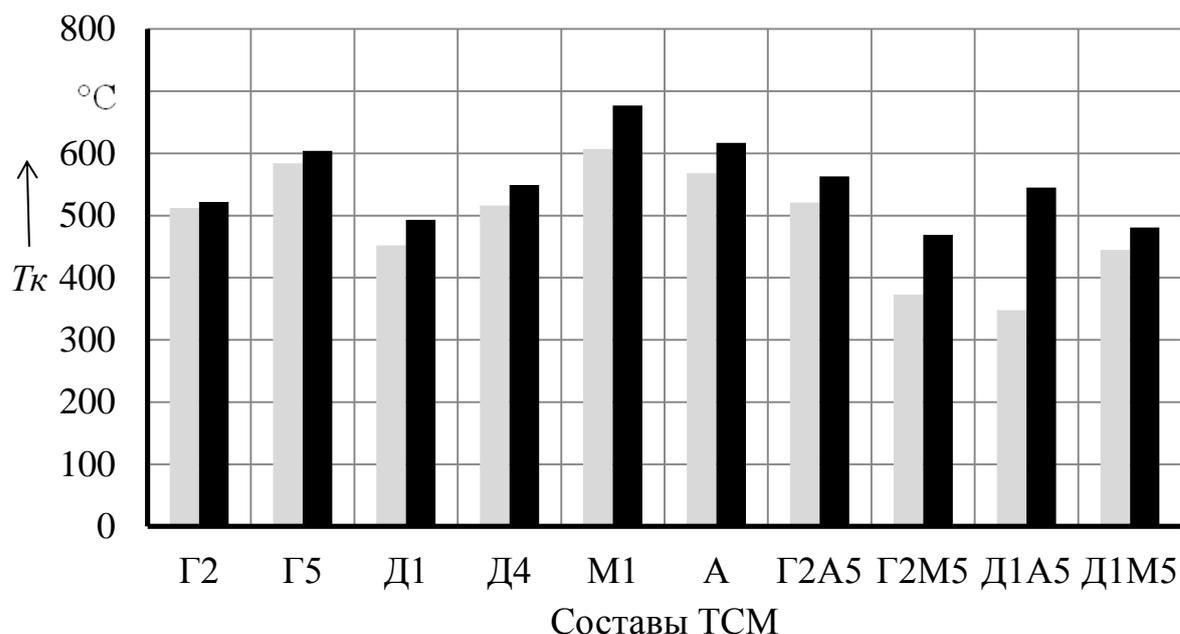


Рис. 2.21. Зависимость средней контактной температуры  $T_k$  от врезной подачи  $S_{ep}$  и состава ТСМ: материал заготовки - сталь Р6М5; круг – 1 300' 40' 76' 25А F46 Q 5 V А;  $V_{cm}$  - 5 м/мин; Г2 - Д1М5 – составы ТСМ по табл. 2.1;

■ –  $T_{красч.}$ ,  $S_{вр} = 0,01$  мм/дв. ход; ■ –  $T_{красч.}$ ,  $S_{вр} = 0,03$  мм/дв. ход

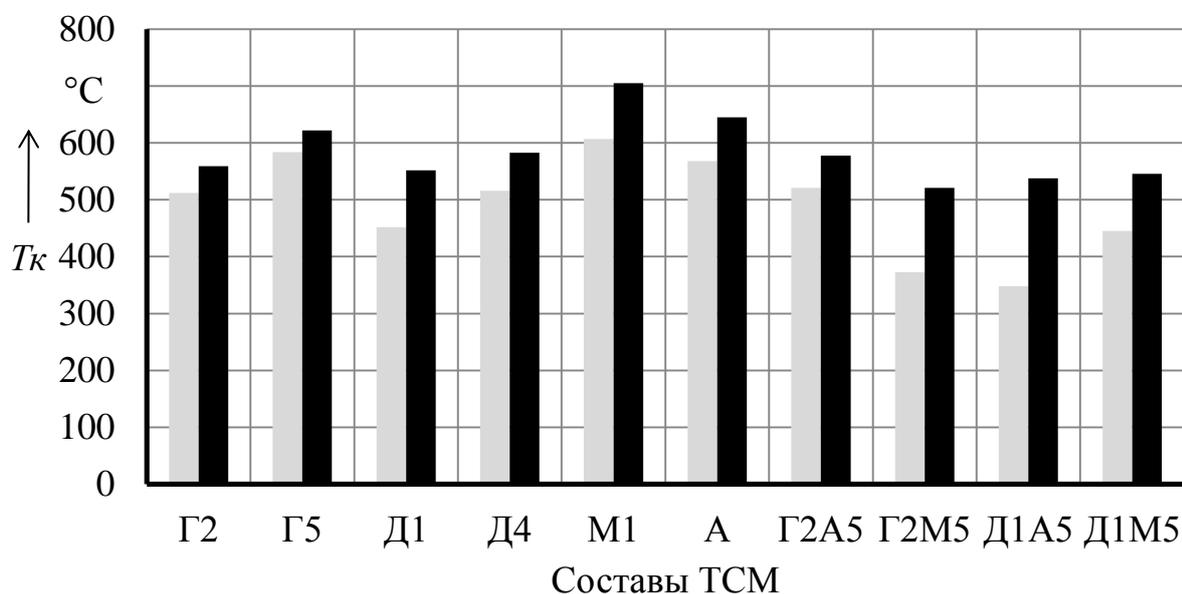


Рис. 2.22. Зависимость средней контактной температуры  $T_k$  от скорости стола  $V_{cm}$  и состава ТСМ: материал заготовки - сталь Р6М5, HRC 63 ... 65; круг –1 300' 40' 76' 25А F46 Q 7 V А;  $S_{ep} = 0,01$  мм/дв. ход; Г2 - Д1М5 – составы ТСМ по табл. 2.1; ■ –

$T_{красч.}$ ,  $V_{cm} = 5$  м/мин; ■ –  $T_{красч.}$ ,  $V_{cm} = 15$  м/мин

Как видно из полученных расчетных данных (табл. 2.7, рис. 2.21 – 2.22),  $T_k$  в зоне шлифования существенным образом зависит не только от режимов обработки, но и материала наполнителя ТСМ. В значительной степени это обусловлено влиянием наполнителя на смазочные свойства ТСМ, которые через силу трения и составляющую силу шлифования  $P_z$  влияют на мощность теплового источника в зоне обработки.

Следует отметить, что наиболее эффективным составом с точки зрения снижения  $T_k$  является состав Г2М5, который содержит в качестве наполнителя высокодисперсный порошок голубой глины и нанопорошок меди. Благоприятное влияние на снижение  $T_k$  оказывает состав Д1М5 на основе высокодисперсного порошка диатомита и нанопорошка меди.

Таким образом, анализ  $T_k$  при шлифовании с применением составов Г2М5, Д1М5 и Г2, Д1, показал, что введение нанопорошка меди в состав ТСМ в качестве антифрикционной присадки снижает среднюю контактную температуру в зоне обработки на 15 – 18 %.

Для оценки адекватности разработанной компьютерной модели было проведено сравнение значений  $T_k$  (табл. 2.7), полученных экспериментальным и расчетным путями (рис. 2.27).

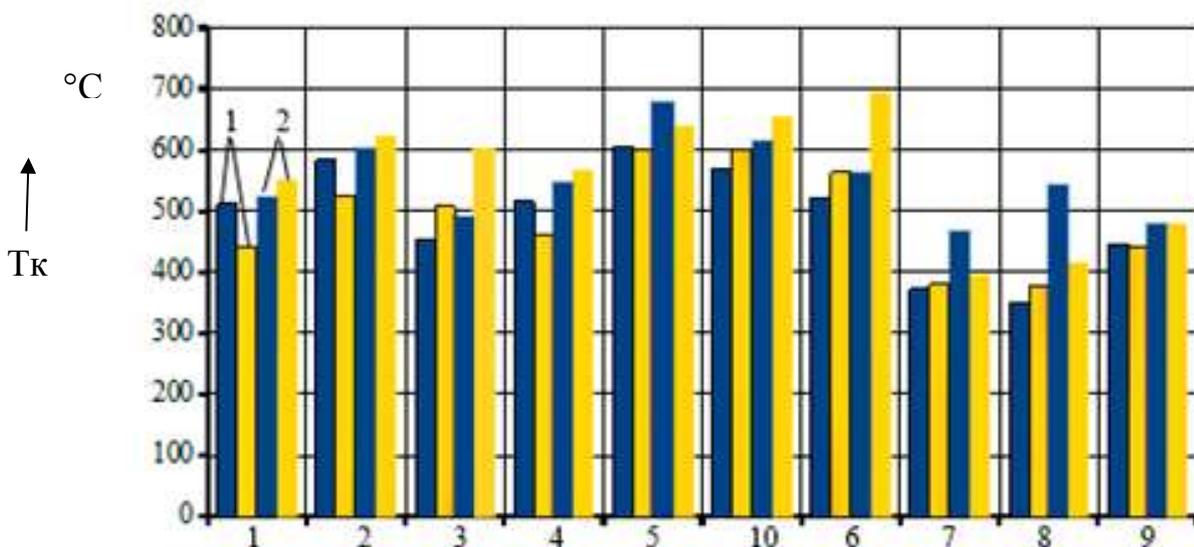


Рис. 2.23. Средняя контактная температура  $T_k$ : материал заготовки – сталь Р6М5; круг – 1 300' 40' 76'25А F46 М 5 V А;  $V_{ст} = 5$  м/мин; Г2 - Д1М5 – составы ТСМ по табл. 2.1; ■ –  $T_{kрасч.}$ ; ■ –  $T_{kэксп.}$ ; 1 и 2 – соответственно  $S_{сп} = 0,01$  и  $0,03$  мм/дв. ход

Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента (рис. 2.23) показал достаточно высокую сходимость расчетных и экспериментальных значений средней контактной температуры (отклонение расчетных и экспериментальных значений средней контактной температуры не превышает 15 %), что свидетельствует о достаточно высокой степени адекватности разработанной компьютерной модели реальному теплофизическому процессу при плоском шлифовании заготовок деталей машин.

## 2.5. Выводы

Компьютерное моделирование температурного поля в заготовке и аналитическое моделирование шероховатости поверхностей, шлифованных с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, привели к следующим результатам:

– показано, что ввиду сложности реализации условий процесса трения, идентичных условиям в зоне шлифования, объективно оценить эффективность ТСМ по результатам оценки смазочного действия не представляется возможным. Поэтому в дальнейшем объективную оценку влияния ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на эффективность плоского шлифования можно получить на основе применения показателей, определяемых в процессе шлифования (параметры шероховатости шлифованной поверхности, средняя контактная температура и др.);

– разработана оригинальная методика определения мощности теплового источника в зоне шлифования при применении ТСМ, а также проведено компьютерное моделирование температурных полей в зоне обработки;

– компьютерным моделированием температурного поля заготовки, шлифованной при применении ТСМ, подтверждены основные закономерности изменения контактных температур в зависимости от режимов обработки и состава ТСМ;

– разработана методика расчета высотного параметра шероховатости  $Ra$  поверхности заготовки, шлифованной с применением ТСМ, учитывающая влияние состава и расхода смазочного материала и продолжительности шлифования. Разработана компьютерная программа на языке С++, позволяющая определить значение параметра шероховатости  $Ra$  в зависимости от условий обработки и состава ТСМ.

### **3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОПЕРАЦИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ**

#### **3.1. Методика экспериментальных исследований**

##### **3.1.1. Критерии оценки эффективности применения твердых смазочных материалов при плоском шлифовании**

Для оценки технологической эффективности применения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, при плоском шлифовании периферией круга использовали перечисленные ниже критерии:

1. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая (по ГОСТ 25142) следующими параметрами:

- среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , мкм;
- высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$ , мкм;
- наибольшая высота неровностей профиля  $Rmax$ , мкм;

2. Составляющие силы шлифования:  $P_z$  и  $P_y$ , Н.

3. Коэффициент шлифования по составляющим силам шлифования  $K_p$  (по ГОСТ 21445):

$$k_p = \frac{P_z}{P_y}, \quad (3.1)$$

4. Средняя контактная температура в зоне шлифования  $T_k$ , °С.

5. Остаточные напряжения в поверхностном слое шлифованной заготовки  $\sigma_o$ , МПа.

6. Амплитуда статических колебаний ШК  $A_{СТ}$ , мм;

7. Амплитуда динамических колебаний ШК  $A_{Д}$ , мм;

##### **3.1.2. Параметры, контролируемые при исследованиях. Методы и средства измерения**

Размеры образцов до и после обработки контролировали универсальными инструментами: штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 (ГОСТ 166, цена деления 0,05 мм, диапазон измерения 0...250 мм, погрешность измерения  $\pm 0,025$  мм);

микрометром МК 25 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 0...25 мм, погрешность измерения  $\pm 0,002$  мм).

Высоту ШК контролировали штангенциркулем ШЦ-П-250-0,05 (ГОСТ 166).

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности  $Ra$  и другие параметры шероховатости измеряли на профилометре мод. 170622 производства московского инструментального завода "Калибр" (рис. 3.1), тип II, степень точности 2 по ГОСТ 19300.



Рис. 3.1. Общий вид профилометра мод. 170622: 1 – блок электронный; 2 – стойка; 3 – призма; 4 – датчик; 5 – привод

Сравнительные технологические испытания ТСМ выполняли на экспериментальной установке, смонтированной на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2.

Для измерения составляющих силы и средней контактной температуры использовали автоматизированное рабочее место (АРМ), которое включает полуискусственную термопару для измерения средней контактной температуры, закрепленную в универсальном динамометре УДМ – 100 для измерения составляющих силы шлифования. УДМ устанавливают на столе плоскошлифовального станка 3Е711ВФ2. Термопара и УДМ подключены с помощью кабеля интерфейсного к восьмиканальному измерительному усилителю, соединенному с помощью интерфейсного кабеля с восьмиканальным аналого-

цифровым преобразователем (АЦП), который непосредственно подключается к персональному компьютеру, удовлетворяющему требованиям операционной системы Windows XP и оснащеному программным пакетом «ACTest – Lite».

Измерение остаточных напряжений проводили на приборе для неразрушающего контроля остаточных напряжений (ОН) в металлах и сплавах СИТОН-АРМ. Технические характеристики прибора приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Техническая характеристика прибора СИТОН-АРМ

Показатели	Параметры
Порог чувствительности определения остаточных напряжений, МПа	20
Число ступеней сканирования	16
Максимальная глубина определения остаточных напряжений, мкм	500
Глубины определения остаточных напряжений, мкм	3, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500.
Материал объектов исследования	Любые токопроводящие материалы
Время измерения параметров	До 6 мин
Форма представления материалов	Графики распределения остаточных напряжений по глубине (эпюры)

Для измерения остаточных напряжений исследуемый образец 1 закрепляли в державке 2, оснащенной измерительной головкой 3 (рис. 3.2). Затем на автоматизированном рабочем месте (рис. 3.3), оснащеном операционной системой Windows XP и программным обеспечением SITON-ARM Interface проводили измерение остаточных напряжений в следующей последовательности:

1. Для обеспечения надежного электрического контакта поверхности испытуемых образцов очищали и обезжиривали в следующей последовательности:

- ветошью удалял шлам и слой TCM;
- очищенную поверхность обезжиривали спиртом и высушивали на открытом воздухе.

2. Создавали протокол измерения в программе SITON-ARM Interface, после чего несколько раз проводили измерения остаточных напряжений в поверхностном слое испытуемого образца.

3. Выбирали калибровку для выбранного протокола измерений.

4. Анализировали результаты измерения, заносили их в форму и сохраняли на компьютере.



Рис. 3.2. Схема закрепления исследуемого образца: 1 – заготовка; 2 – державка; 3 - датчик



### 3.3. Автоматизированное рабочее место для измерения остаточных напряжений

Слой ТСМ на рабочую поверхность ШК наносили с помощью устройства, представленного на рис. 3.4. Подача ТСМ осуществляется поршнем 4 при воздействии на него груза 5 массой 5 кг. Для осуществления возвратного движения установлена пружина 6. За счет конструктивных особенностей устройства подачи ТСМ наличие двух поршней, расположенных в стаканах 3, позволяет одновременно

или последовательно наносить два различных смазочных покрытия. Амплитуду колебаний ШК измеряли с помощью виброизмерительного комплекса на базе плоскошлифовального станка мод. 3E711ВФ2, состоящего из пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей ДН-3 (рис. 3.5), подключенных к усилителю, выходной аналоговый сигнал которого преобразовывался в цифровой с помощью АЦП мод. LA20-USB. Схема виброизмерительного комплекса на базе плоскошлифовального станка 3E711ВФ2 представлена на рис. 3.6.

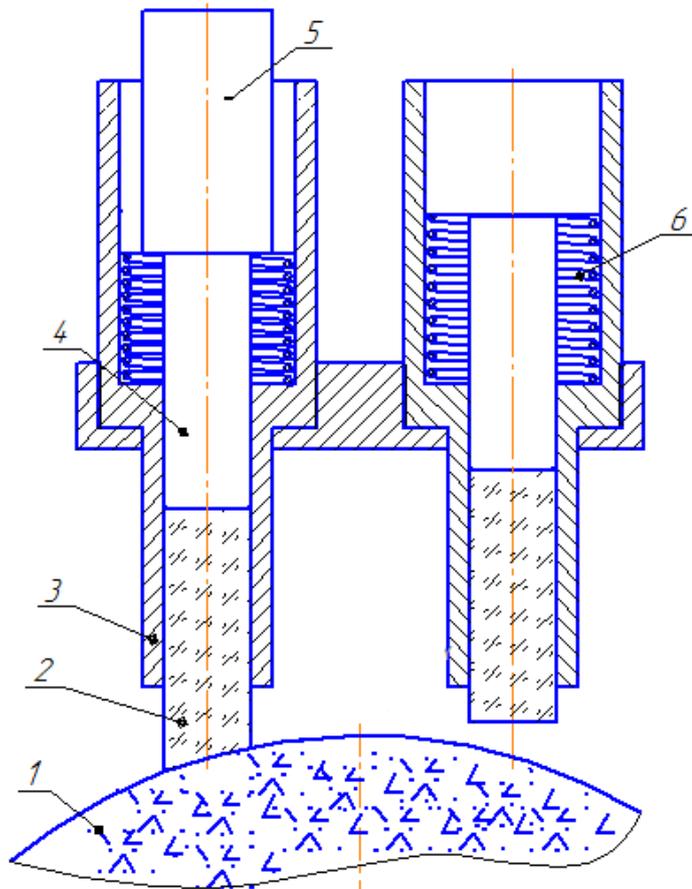


Рис. 3.4. Устройство для нанесения ТСМ на ШК: 1 – ШК; 2 – ТСМ; 3 – стакан; 4 – поршень; 5 – груз; 6 – пружина.



Рис. 3.5. Общий вид виброизмерительного преобразователя ДН-3

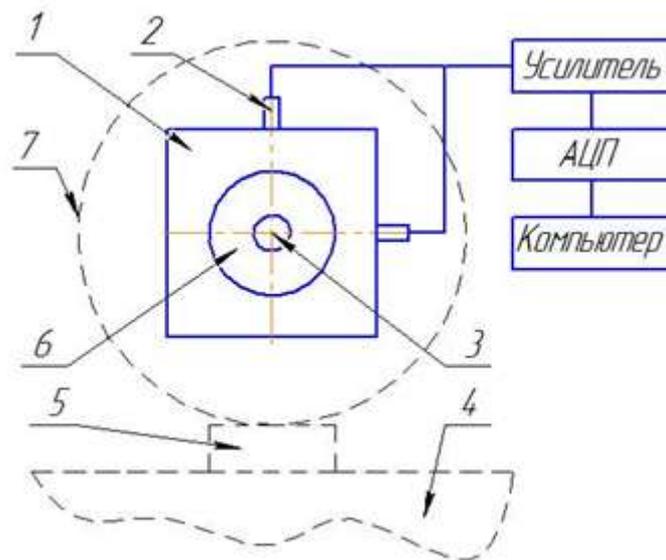


Рис. 3.6. Схема виброизмерительного комплекса на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2: 1 – шпиндельный узел; 2 – вибродатчики; 3 – выходной вал шпиндельного узла; 4 – магнитная плита; 5 – заготовка; 6 – планшайба; 7 – шлифовальный круг

Комплекс состоит из 2-х вибродатчиков 2, расположенных на шпиндельном узле 1 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Данные с преобразователей передаются на усилитель, затем на АЦП, информация с которого поступает на компьютер и обрабатывается.

Исследование амплитуды колебаний ШК в процессе шлифования заготовок из стали Р6М5 с применением различных составов ТСМ проводили в следующей последовательности:

1. Правила ШК.
2. Наносили ТСМ на рабочую поверхность ШК. При этом варьировали составами ТСМ и временем нанесения смазочного материала на рабочую поверхность ШК

(15 с; 30 с). В качестве ТСМ выбирали составы, показавшие наибольшую эффективность в процессе экспериментальных исследований шероховатости шлифованных поверхностей: Г2, Д1, М1, А (составы см. табл.2.1).

3. Шлифовали заготовки на режиме:  $V_k = 35$  м/с,  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{вр} = 0,01$  мм/дв. ход,  $S_n = 1$  мм/дв. ход.
4. Замеряли амплитуду колебаний ШК по схеме, представленной на рис. 3.14. По результатам измерений получали осциллограмму амплитуды колебаний ШК по осям Y и Z в мВ (рис. 3.7).

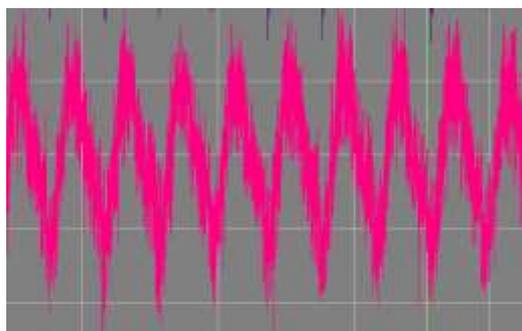
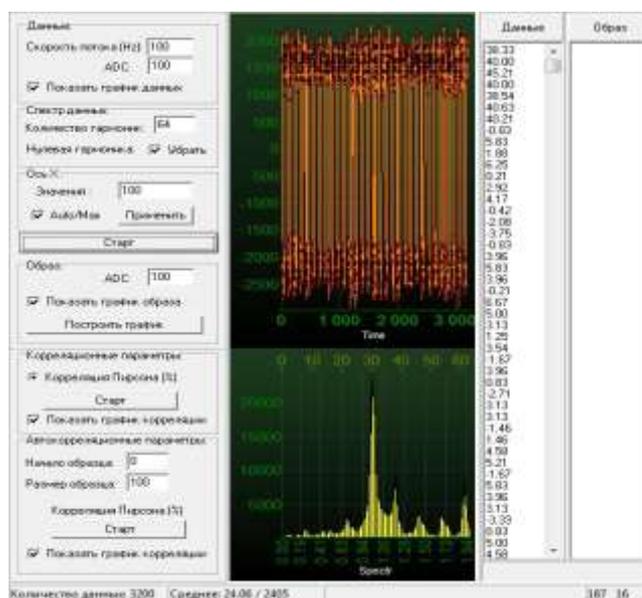


Рис. 3.7. Осциллограмма колебаний ШК в направлении оси Y

5. По полученным осциллограммам амплитуды колебаний ШК проводили спектральный анализ с помощью программного пакета Discrete Fourier Transform ver. 4.0 (производства компании Keklab, рис. 3.8).



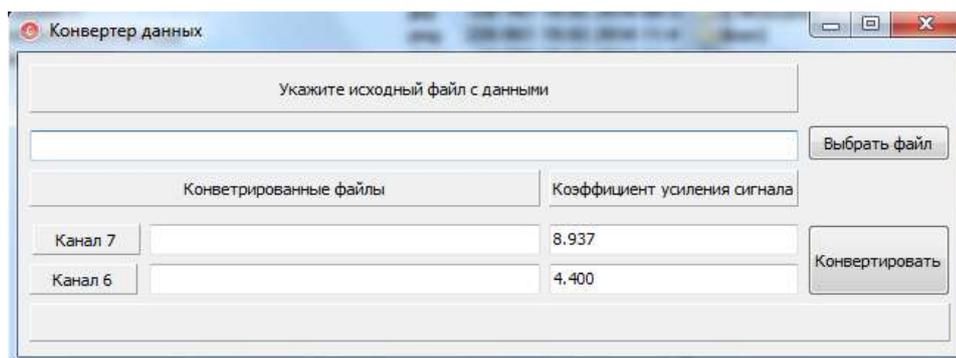


Рис. 3.9. Окно программы конвертера данных

Для согласования работы программы записи данных осциллографа LA20-USB и Discrete Fourier Transformver. 4.0 на языке C++ был написан конвертер данных (на данный программный продукт получено свидетельство о регистрации № 2014616625, приложение Ж), осуществляющий перевод данных осциллограммы в удобный для обработки программой Discrete Fourier Transformver. 4.0 формат (рис. 3.9). Исходный код программы конвертера данных приведен в приложении Д.

Конвертер данных автоматически учитывает коэффициент усиления сигнала по соответствующему каналу принимаемого усилителем сигнала. Для 6-ого канала коэффициент усиления сигнала равен 8,937, для 7-ого канала – 4,400.

6. Величины амплитуд колебания ШК по соответствующим осям определяли по формуле [102]:

$$A_{Dz} (\text{мм}) = \frac{0,02533 \cdot A_{Dz}(B)}{k \cdot f^2}, A_{Dy} (\text{мм}) = \frac{0,02533 \cdot A_{Dy}(B)}{k \cdot f^2}, \quad (3.2)$$

где  $k = 0,010$  – коэффициент преобразования датчика ДН-3 в  $(B \cdot c^2)/m$ ;  $A_{Dz}(B)$ ,  $A_{Dy}(B)$  – амплитуда динамических колебаний ШК в мВ;  $f$  – частота колебаний ШК в Гц.

7. Полную величину амплитуды колебаний ШК определяли по формуле:

$$A_D = \sqrt{A_{Dz}^2 + A_{Dy}^2}, \quad (3.3)$$

где  $A_{Dz}$  – амплитуда динамических колебаний в направлении оси Z, мм;  $A_{Dy}$  – амплитуда динамических колебаний в направлении оси Y, мм.

### 3.1.3 Условия и порядок проведения исследований и техника эксперимента

#### 3.1.3.1. Номенклатура и требования к шлифовальным кругам

На основании обзора технологий шлифования без применения СОЖ, изложенного в разделе 1.1, в дальнейшем использовали схему плоского шлифования периферией круга.

Перед испытаниями ШК проверяли на соответствие их основных геометрических параметров требованиям ГОСТ 2424. Величина допускаемого дисбаланса ШК не превышала значений, определяемых ГОСТ 3060 и ГОСТ 19534. Твердость и механическая прочность кругов соответствовали требованиям ГОСТ 12.3.028. Твердость контролировали акустическим методом с помощью прибора «Звук–203М», механическую прочность кругов определяли на стенде «СИП–800». Перед установкой на испытательный стенд все круги проверяли на наличие сколов и трещин. В процессе сравнительных испытаний проводили статическую балансировку ШК на стенде.

Таблица 3.2

Номенклатура шлифовальных кругов для проведения исследований

Обозначение ШК	Характеристика
K1	1 300' 40' 76' 25A F60 M 7 V A
K2	1 300' 40' 76' 25A F46 M 7 V A
K3	1 300' 40' 76' 25A F46 Q 7 V A

#### 3.1.3.2. Образцы для проведения исследований технологической эффективности ТСМ

Исследование технологической эффективности ТСМ проводили на образцах (рис. 3.10) из материала – представителя пятой группы обрабатываемости – стали Р6М5, *HRC*, 63 ... 65. (табл. 3.4 и 3.5).

Образцы для проведения испытаний изготавливали из одной партии материалов, которые соответствовали требованиям стандартов по химическому

составу и физико-механическим свойствам (табл. 3.4 и 3.5). Рассеивание твердости образцов не превышало  $\pm 3,5 \%$ . Перед началом каждой серии опытов партию заготовок вышлифовывали в один размер с допуском по 7 квалитету и шероховатостью по параметру  $Ra \leq 1,6$  мкм. Отклонение шероховатости поверхности в партии образцов не превышало 8 ... 10 %.

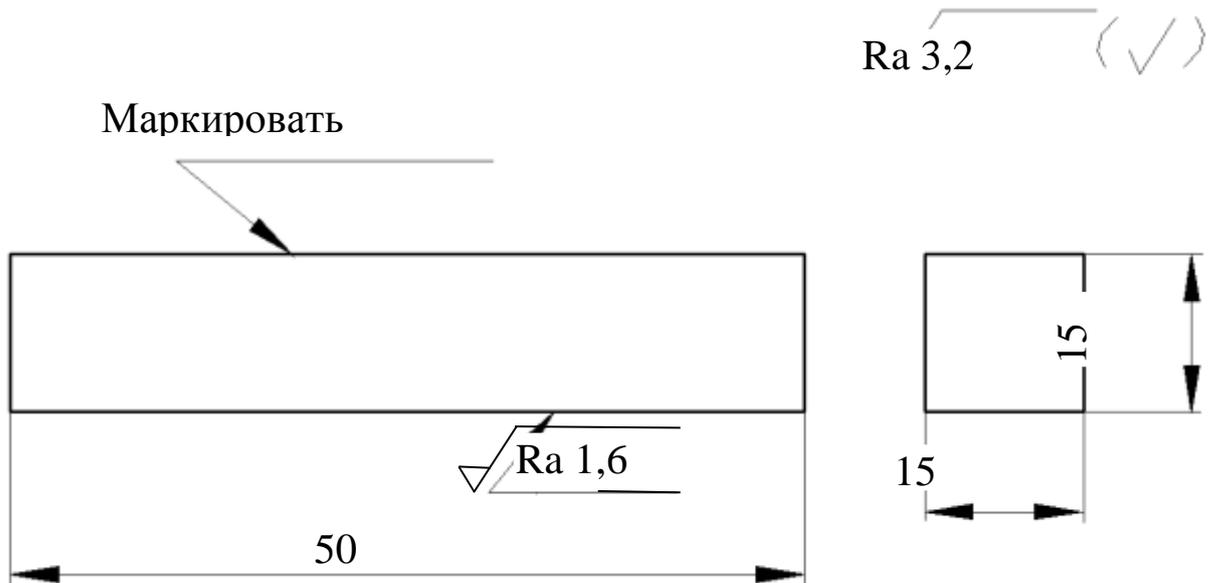


Рис. 3.10. Заготовка из стали P6M5,  $HRC_{963...65}$

### 3.1.3.3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и техника их применения

При проведении сравнительных испытаний составы ТСМ представлены в табл. 2.1. ТСМ наносили на рабочую поверхность ШК по схеме, приведенной на рис. 3.12.

### 3.1.3.4. Режимы шлифования и правки

По результатам предварительных экспериментов исследования проводили с окружной скоростью ШК  $V_k = 35$  м/с, врезной подачей  $S_{вр}$  варьировали в пределах от 0,01 до 0,03 мм/дв.х, скоростью стола  $V_{ст}$  – от 5 до 15 м/мин.

Таблица 3.4.

Химический состав материалов образцов для проведения экспериментальных исследований

Материал образцов		Химический состав, %										
Обозначение	Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Mo	W	V
M1	P6M5	0,80 ... 0,88	до 0,40	до 0,03	3,80 ... 4,40	до 0,30	до 0,02	–	–	5,0 ... 5,5	5,5 ...5, 65	1,7 ...2,1

Таблица 3.5.

Режимы термообработки

Материал образцов		Режим термообработки	Твердость, HRC
Обозначение	Марка стали		
M1	P6M5	Закалка в масле (1210...1230) °C с подогревом до 1000°C, охлаждение в масле до (300...450) °C, на воздухе до 20 °C, трехкратный отпуск (560...570) °C	63...65

Режимы шлифования выбирали в соответствии с рекомендациями, изложенными в "Общемашиностроительных нормативах времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II. Нормативы режимов резания" [56] с учетом материала шлифуемых заготовок, прогнозируемой шероховатости шлифуемой поверхности, срока службы станка, жесткости технологической системы.

Круги правили методом обтачивания, используя в качестве правящего инструмента алмазный карандаш 3908-0083 С2 (ГОСТ 607), с непрерывной подачей СОЖ поливом свободно падающей струей с расходом 5...8 дм<sup>3</sup>/мин по режиму:

- 3 рабочих хода с подачей  $S_{\text{п}} = 0,03$  мм/дв.ход;
- 3 прохода без подачи алмазного карандаша.

Окружную скорость круга  $V_{\text{к}}$ , поперечную подачу  $S_{\text{п}}$ , подачу на врезание  $S_{\text{вр}}$  контролировали по лимбам станка.

#### **3.1.3.4. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов**

Технологическая эффективность применения ТСМ, как было показано в главе 2, зависит как от материала высокодисперсного наполнителя и от вида применяемой наноприсадки, так и от комбинации наполнителя и наноприсадки в ТСМ. В связи с этим в ходе исследований, представленных в параграфах 3.2 и 3.3, для объективной оценки влияния состава ТСМ на технологическую эффективность плоского шлифования были испытаны в лабораторных условиях восемь составов ТСМ, отличающихся материалом наполнителя, его содержанием и материалом наноприсадки. За базу для сравнения принимали результаты шлифования составами М1 и А (см. табл.2.1).

Исследования проведены однофакторным и многофакторным планами

в лабораторных условиях и в условиях действующего производства. На основе результатов исследований разработаны рекомендации по проектированию составов ТСМ и техники их применения.

Статистическая обработка экспериментальных данных включала расчеты средних величин, средних квадратических отклонений и коэффициентов вариации значений критериев технологической эффективности операций шлифования.

Для получения эмпирических зависимостей  $T_k$ ,  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R_{max}$  от состава ТСМ, скорости стола и врезной подачи, зернистости и твердости ШК использовали многофакторное планирование эксперимента.

При составлении плана эксперимента использовали полный факторный эксперимент (ПФЭ)  $2^k$ , где “к” - число факторов. При исследовании технологической эффективности ТСМ число факторов “к” принимали равным четырем (см. табл. 3.6). Обработку результатов экспериментов и определение коэффициентов регрессии проводили для уровня значимости 0,95 по методике [57].

Регрессионные зависимости получали на основе обработки экспериментальных данных с помощью программного пакета Regressv 2.3 производства компании ENEK Group (рис. 3.11) в виде:

$$Y = a_0 \cdot x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2} \cdot x_3^{a_3} \cdot \dots \cdot x_n^{a_n}, \quad (3.4)$$

где  $x_1 \dots x_n$  – варьируемые параметры процесса шлифования;  $Y$  – выходное значение контролируемого показателя качества;  $a_0 \dots a_n$  – весовые коэффициенты.



Рис. 3.11. Окно программы Регрессия 2.3

Матрица планирования эксперимента  $2^4$  при шлифовании с применением TCM

Условия планирования	Факторы								
	$S_{ep}$	$V_{cm}$	Зернистость круга $F$	Твердость круга $S$					
	мм/дв.ход	м/мин	мкм	ЗИ					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$					
Верхний уровень	0,03	15	250	49					
Основной уровень	0,02	10	325	52					
Нижний уровень	0,01	5	400	55					
Номер опыта	Действительные значения				Кодированные значения				
	$S_{ep}$ , мм/дв.ход	$V_{cm}$ , м/мин	Зернистость круга $F$ , мкм	Твердость круга $S$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,01	5	250	49	+	-	-	-	-
2	0,03	5	250	49	+	+	-	-	-
3	0,01	15	250	49	+	-	+	-	-
4	0,03	15	250	49	+	+	+	-	-
5	0,01	5	400	49	+	-	-	+	-
6	0,03	5	400	49	+	+	-	+	-
7	0,01	15	400	49	+	-	+	+	-
8	0,03	15	400	49	+	+	+	+	-
9	0,01	5	250	55	+	-	-	-	+
10	0,03	5	250	55	+	+	-	-	+
11	0,01	15	250	55	+	-	+	-	+
12	0,03	15	250	55	+	+	+	-	+
13	0,01	5	400	55	+	-	-	+	+
14	0,03	5	400	55	+	+	-	+	+
15	0,01	15	400	55	+	-	+	+	+
16	0,03	15	400	55	+	+	+	+	+

### 3.1.5. Обработка результатов исследования и их анализ

#### Расчет числа параллельных опытов

Число параллельных опытов в серии рассчитали по методике [58, 59], приняв нормальный закон распределения случайной величины:

$$m = \frac{t_{\beta}^2 \cdot \sigma_{Y_i}^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.5)$$

где  $t_{\beta}$  – квантиль нормального распределения измеряемого параметра при доверительной вероятности  $\beta$  (выбирали рекомендуемое значение  $\beta = 0,95$ , при этом  $t_{\beta} = 1,96$ );  $\sigma_{Y_i}^2$  – дисперсия распределения измеряемого параметра;  $\varepsilon$  – заданная ошибка выборочной средней измеряемого параметра. При этом  $\varepsilon = \alpha \cdot \bar{Y}$ , где  $\alpha$  – относительная ошибка среднего значения параметра. Приняли  $\alpha = 15$  (при более точных измерениях принимали  $\alpha = 25$ );  $\bar{Y}$  – среднее значение параметра.

Величины  $\bar{Y}$  и  $\sigma_{Y_i}^2$  определили по результатам предварительных экспериментов:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} Y_i}{n_n}, \quad (3.6)$$

где  $Y_i$  – текущее значение параметра при  $i$ -ом опыте;  $n_n$  – количество опытов предварительного эксперимента.

$$\sigma_{Y_i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_n - 1}. \quad (3.7)$$

Число параллельных опытов рассчитывали по результатам предварительных экспериментов для параметра  $T_k$  при шлифовании заготовок из стали Р6М5, как параметра, имеющего наибольший разброс значений при замерах (табл. 3.7).

Расчет необходимого числа параллельных опытов  $m$  при исследовании технологической эффективности операции шлифования с применением ТСМ

№ ОПЫТ а	Параметр $T_k$				Расчет числа параллельных ОПЫТОВ
	$S_{сп}$ , мм/дв.ХОД				
	0,01		0,03		
	$V_{см}$ , м/МИН				
	5	15	5	15	
1	421	499	520	549	1) $t_{\beta}^2 = 3,842$ ; $Y = 435$ ; $\varepsilon = 15$ ; $\sigma_{Y_i}^2 = 123,6$ ; $m = 2,11$ ; 2) $\bar{Y} = 488$ ; $\sigma_{Y_i}^2 = 148,4$ ; $m = 2,53$ ; 3) $\bar{Y} = 500$ ; $\sigma_{Y_i}^2 = 114$ ; $m = 1,94$ ; 4) $\bar{Y} = 561$ ; $\sigma_{Y_i}^2 = 134,4$ ; $m = 2,29$ . Принимаем число параллельных опытов в серии $m = 3$ .
2	442	490	496	579	
3	433	486	491	564	
4	459	480	502	550	
5	433	470	491	568	
6	422	503	500	556	

### Метрологическая оценка

При проведении экспериментальных исследований для оценки достоверности результатов измерения и выявления промахов (аномальных результатов) рассчитывали статистический критерий [59]:

$$Q_3 = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{Y_n - Y_1}, \quad (3.8)$$

где  $Y_n$  – аномальное значение результатов измерения;  $Y_{n-1}$  – значение результата, соседнего с  $Y_n$  в вариационном ряду;  $(Y_n - Y_1)$  – размах выборки (разность между значениями крайних членов вариационного ряда).

Если экспериментальное значение  $Q_3$  превышало табличное  $Q_T$  (табл. 4, [59]) для конкретного значения доверительной вероятности  $P$ , то результат  $Y_n$  считали аномальным (промахом).

Метрологическую оценку проводили, используя методику, изложенную в [59].

Абсолютные погрешности измерений  $\Delta Y_i$  определяли, суммируя квадратично систематические и случайные погрешности измерения:

$$\Delta Y_i = \pm \sqrt{t_\gamma^2 \cdot \sigma_{Y_i} + \Delta Y_{ic}^2}, \quad (3.9)$$

где  $\Delta Y_{ic}$  – систематическая погрешность измерения;  $t_\gamma^2 \cdot \sigma_{Y_i}$  – случайная погрешность измерения;  $t_\gamma$  – коэффициент риска, определяемый доверительной вероятностью  $\gamma$  и числом измерений  $n$ ;  $\sigma_{Y_i}$  – средняя квадратическая погрешность измерения:

$$\sigma_{Y_i} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{(n_i - 1)}}. \quad (3.10)$$

Относительная погрешность измерения:

$$\delta_{Y_i} = \pm \frac{\Delta Y_i}{\bar{Y}}. \quad (3.11)$$

Абсолютные погрешности измерения критериев, являющихся результатами косвенных измерений, определяли по формуле:

$$\Delta x = \sum_j \frac{dx}{dY_j} \cdot \Delta Y_j, \quad (3.12)$$

### Методика проверки адекватности математических моделей

Гипотезу однородности дисперсий принимали, если расчетное значение критерия Кохрена, рассчитываемого по формуле (3.10) оказывалось меньше табличного:

$$G_p = \frac{S_{v\max}^2}{\sum S_{vi}^2}, \quad (3.13)$$

где  $S_{v\max}^2$  – максимальное значение выборочной дисперсии воспроизводимости;  $S_{vi}^2$  – дисперсия воспроизводимости параллельных наблюдений для  $i$  – ой точки плана матрицы:

$$S_{vi}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (\bar{Y}_i - Y_{i,j})^2}{m-1}, \quad (3.14)$$

где  $\bar{Y}_i$  – среднее значение параметра  $i$  – ого опыта:

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{m}, \quad (3.15)$$

где  $Y_{i,j}$  –  $j$  – ое значение параметра  $i$  – ого опыта.

Табличное значение критерия Кохрена находили при уровне значимости  $q = 5 \%$  и следующих степенях свободы:

$$\begin{aligned} f_1 &= m - 1; \\ f_2 &= N, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где  $N$  – число серий.

Гипотезу адекватности итоговой зависимости реальному процессу шлифования и заточки принимали, если расчетное значения критерия Фишера  $F_p$ , определенного по формуле (3.19), оказывалось меньше его табличного значения  $F_T$ :

$$F_p < F_m. \quad (3.17)$$

Табличное значение критерия Фишера  $F_T$  находили при уровне значимости  $g = 5 \%$  и следующих степенях свободы [59]:

$$\begin{aligned} f_3 &= N - c; \\ f_4 &= N \cdot (m - 1), \end{aligned} \quad (3.18)$$

где  $c$  – число значимых коэффициентов регрессионной зависимости (включая  $a_0$ ).

Расчетный критерий Фишера вычисляли по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\sigma}^2}, \quad (3.19)$$

где  $S_{ад}$  – дисперсия адекватности;  $S_{д}$  – дисперсия параметра оптимизации.

Дисперсию адекватности для проверки гипотезы адекватности итоговых зависимостей реальному процессу заточки находили по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N - c} \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_{i,p})^2, \quad (3.20)$$

где  $\bar{Y}_i$  – среднее арифметическое по  $m$  наблюдениям в произвольный момент времени;  $Y_{i,p}$  – математическое ожидание параметра оптимизации

(расчетное значение параметра в произвольный момент времени).

Дисперсию параметра оптимизации вычисляли по формуле:

$$S_{\sigma}^2 = \frac{1}{N \cdot (m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y}_{i,j})^2 . \quad (3.21)$$

### 3.2. Исследование технологической эффективности ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании периферией круга

#### 3.2.1. Исследование влияния ТСМ на теплонапряженность в зоне шлифования

По результатам многофакторного эксперимента получили регрессионные зависимости средней контактной температуры от скорости стола  $V_k$ , врезной подачи  $S_{ep}$ , зернистости и твердости ШК, пример которых представлен в табл. 3.8 (подробно см. прил. Л - Н).

Адекватность регрессионных зависимостей проверяли по критерию Фишера. Пример результатов оценки адекватности регрессионных зависимостей приведен на рис. 3.12. По итогам оценки был сделан вывод об адекватности всех полученных зависимостей. Расчетное значение критерия Фишера для полученных регрессионных зависимостей при применении различных составов ТСМ не превышал табличного значения, равного 3,41.

Таблица 3.8

Регрессионные зависимости для расчета средней контактной температуры при шлифования заготовок из стали Р6М5 с применением ТСМ

Состав ТСМ ( табл. 2.1)	Уравнение регрессии
Г2	$T_{\kappa} = 144,62 S_{ep}^{0,038} V_{cm}^{0,094} Z^{0,031} S^{0,346}$
Г5	$T_{\kappa} = 0,944 S_{ep}^{0,044} V_{cm}^{0,074} Z^{0,341} S^{2,130}$
Д1	$T_{\kappa} = 35,31 S_{ep}^{0,101} V_{cm}^{0,198} Z^{0,060} S^{0,582}$
Д4	$T_{\kappa} = 6,5 S_{ep}^{0,123} V_{cm}^{0,154} Z^{-0,083} S^{1,240}$

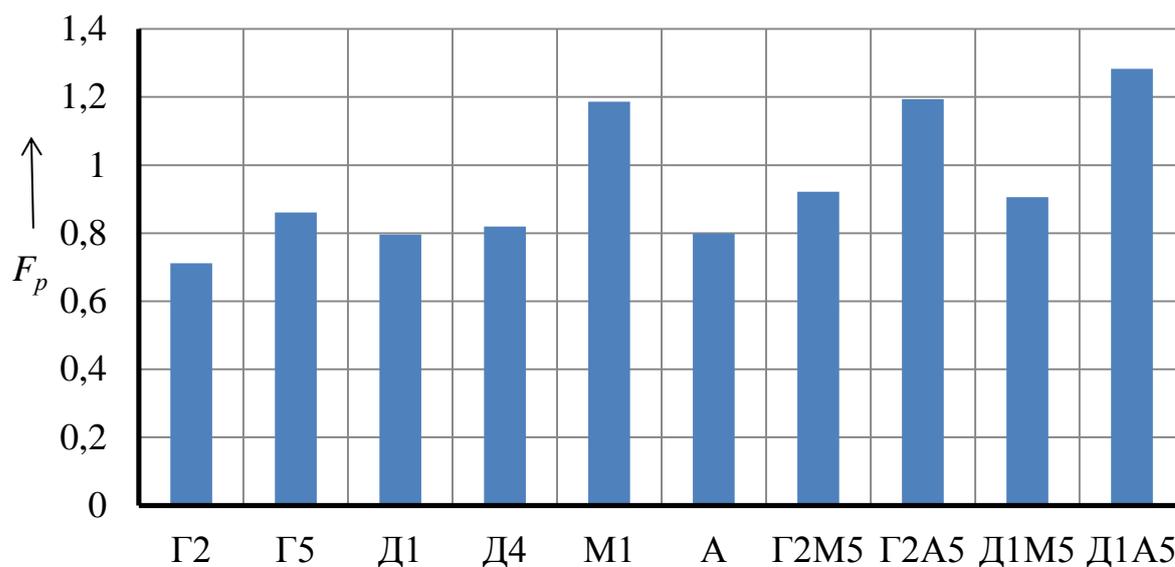


Рис. 3.12. Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  для оценки адекватности регрессионных зависимостей для расчета средней контактной температуры  $T_k$  при шлифовании с применением различных составов ТСМ: Г2 – Д1А5 составы по табл. 2.1.

Сравнительный анализ влияния ТСМ на среднюю контактную температуру показал, что применение в составе ТСМ высокодисперсных наполнителей и антифрикционных наноприсадок, существенным образом влияет на теплообразование в зоне шлифования (рис. 3.13, 3.14). При шлифовании с применением всех испытанных составов ТСМ средняя контактная температура уменьшилась на 13...28 % по сравнению с применением базовых составов ТСМ (составы М1 и А, табл. 2.1). Анализ  $T_k$  при применении ТСМ, содержащих высокодисперсные порошки голубой глины (составы Г2 и Г5, табл. 2.1), показал, что по этому критерию предпочтение следует отдать составу Г2, содержащем 40 % порошка голубой глины и 60 % связующего. Уменьшение содержания порошка голубой глины до 25 % и введение в состав ТСМ 15 % графита привело к увеличению  $T_k$ . Анализ эффективности применения ТСМ с наполнителем из голубой глины косвенно подтверждает гипотезу о реализации ею смазочного действия за счет наличия у нее ламеллярной структуры. Варьирование содержанием порошка диатомита в диапазоне от 40 % (состав

Д1, табл. 2.1) до 25 % с включением 15 % графита (состав Д5, табл. 2.1) не оказало существенного влияния на величину  $T_k$ .

Среди всех испытанных составов наибольшее снижение средней контактной температуры было отмечено при применении состава Г2М5. Сравнивая этот состав с составом Г2, не содержащим нанопорошок меди, можно констатировать, что введение в состав ТСМ нанопорошка меди обеспечивает дополнительное снижение средней контактной температуры в зоне шлифования до 20 – 25 % по сравнению с составом Г2 с наполнителем из порошка голубой глины. По сравнению с составом Д1 использование состава Д1М5 с наноприсадкой порошка меди обеспечивает дополнительное снижение средней контактной температуры от 5 до 15%.

Оценивая влияние нанопорошка алюминия на изменение теплообразования в зоне шлифования, можно заключить, что его введение в состав ТСМ приводит к увеличению  $T_k$ . Например, при введении в состав Г2 нанопорошка алюминия наблюдается увеличение средней контактной температуры на 5 – 25%.

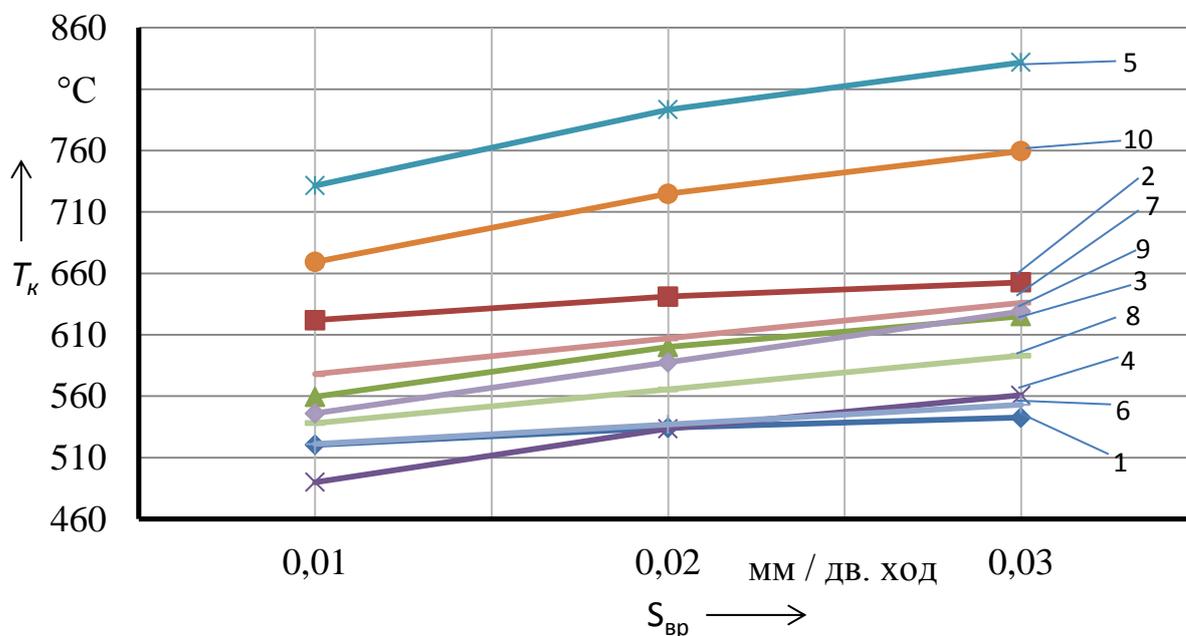


Рис. 3.13. Зависимость средней контактной температуры  $T_k$  от врезной подачи  $S_{вр}$ , мм / дв. ход: круг - 1 300` 40` 76` 25А F46 Q 7 V А,  $V_{cm} = 15$  м/мин; 1 – 10 – номера ТСМ по табл. 2.1

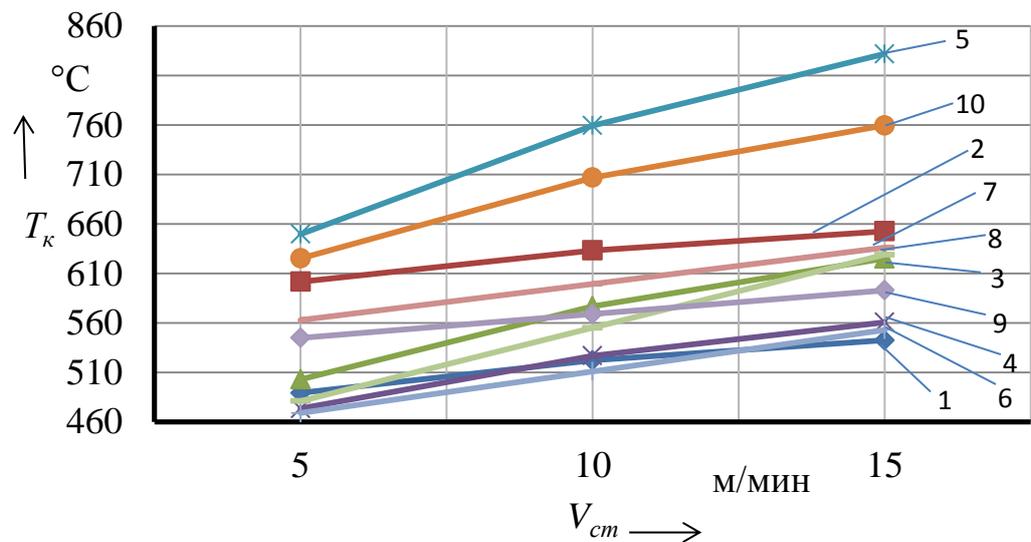


Рис. 3.14. Зависимость средней контактной температуры  $T_k$  от скорости стола  $V_{cm}$ : круг - 1 300` 40` 76` 25A F46 Q 7 V A,  $S_{ep} = 0,03$  мм/дв.ход; 1 – 10 – номера TSM по табл. 2.1

В первую очередь, это можно объяснить высоким сродством алюминия к материалу абразивного инструмента, что в совокупности с высокой средней контактной температурой в зоне обработки и последующим расплавлением наполнителя, вероятнее всего, приводит к интенсивному налипанию последнего на активные аз. В конечном итоге, это приводит к существенному увеличению коэффициента трения, и, как следствие, к увеличению мощности теплового источника.

### 3.2.2. Результаты исследований влияния TSM на шероховатость шлифованных поверхностей

По результатам многофакторного эксперимента получили регрессионные зависимости высотных параметров шероховатости шлифованных поверхностей деталей  $Ra$ ,  $Rz$  и  $Rmax$  от скорости стола  $V_k$ , врезной подачи  $S_{ep}$ , зернистости и твердости ШК, пример которых представлен в табл. 3.9 (подробно см. прил. Л - Н).

Регрессионные зависимости для расчета высотных параметров шероховатости при шлифовании заготовок из стали Р6М5 с применением ТСМ

Состав ТСМ	Уравнение регрессии
Г2	$Ra = 1,206 \times 10^{11} S_{ep}^{0,194} V_{cm}^{0,215} Z^{1,203} S^{-8,639}$
	$Rz = 1,48 \times 10^9 S_{ep}^{0,161} V_{cm}^{0,181} Z^{0,964} S^{-6,099}$
	$Rmax = 1,34 \times 10^9 S_{ep}^{0,185} V_{cm}^{0,145} Z^{1,180} S^{-6,164}$
Г5	$Ra = 8,53 \times 10^2 S_{ep}^{0,308} V_{cm}^{-0,015} Z^{0,016} S^{-1,822}$
	$Rz = 9,44 \times 10 S_{ep}^{0,254} V_{cm}^{-0,148} Z^{0,124} S^{-0,863}$
	$Rmax = 1,17 \times 10^5 S_{ep}^{0,196} V_{cm}^{-0,0065} Z^{0,156} S^{-2,796}$
Д1	$Ra = 2,35 \times 10^5 S_{ep}^{0,226} V_{cm}^{0,431} Z^{0,141} S^{-3,754}$
	$Rz = 2,31 \times 10^4 S_{ep}^{0,128} V_{cm}^{0,292} Z^{0,107} S^{-2,597}$
	$Rmax = 7,42 \times 10^5 S_{ep}^{0,163} V_{cm}^{0,295} Z^{0,235} S^{-3,492}$

Адекватность регрессионных зависимостей проверяли по критерию Фишера. Пример результатов оценки адекватности регрессионных зависимостей приведен на рис. 3.15. По итогам оценки был сделан вывод об адекватности всех полученных зависимостей. Расчетное значение критерия Фишера для полученных регрессионных зависимостей при применении различных составов ТСМ не превышал табличного значения, равного 3,41.

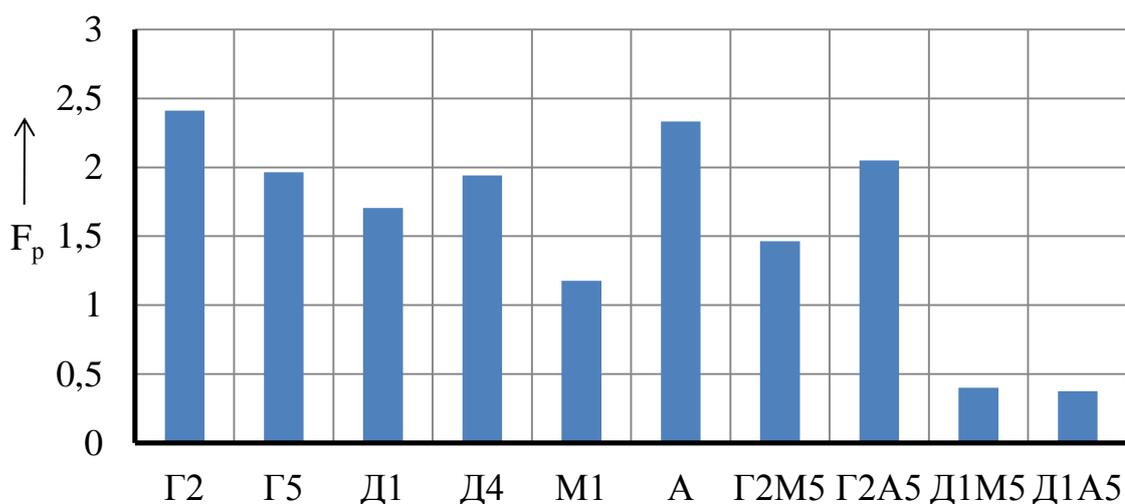


Рис. 3.15. Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  для оценки адекватности регрессионных зависимостей высотных параметров шероховатости при шлифовании заготовок из стали Р6М5 с применением ТСМ Г2 – Д1А5 - составы по табл. 2.1

Анализ экспериментальных данных (рис. 3.16, 3.17) показал, что введение в состав ТСМ в качестве наполнителя высокодисперсных порошков голубой глины и диатомита (составы Г2 и Д1) оказывает существенное влияние на высотный параметр шероховатости  $Ra$  поверхности шлифованной детали. Очевидно, это обусловлено влиянием высокодисперсного наполнителя на амплитуду динамических колебаний шлифовального круга  $A_d$  (рис. 3.18, 3.19). Это наблюдение подтверждается выводами, сделанными в работе Белова М. А. [26] при исследовании взаимосвязи амплитуды динамических колебаний ШК и шероховатости поверхностей деталей, шлифованных с применением СОЖ.

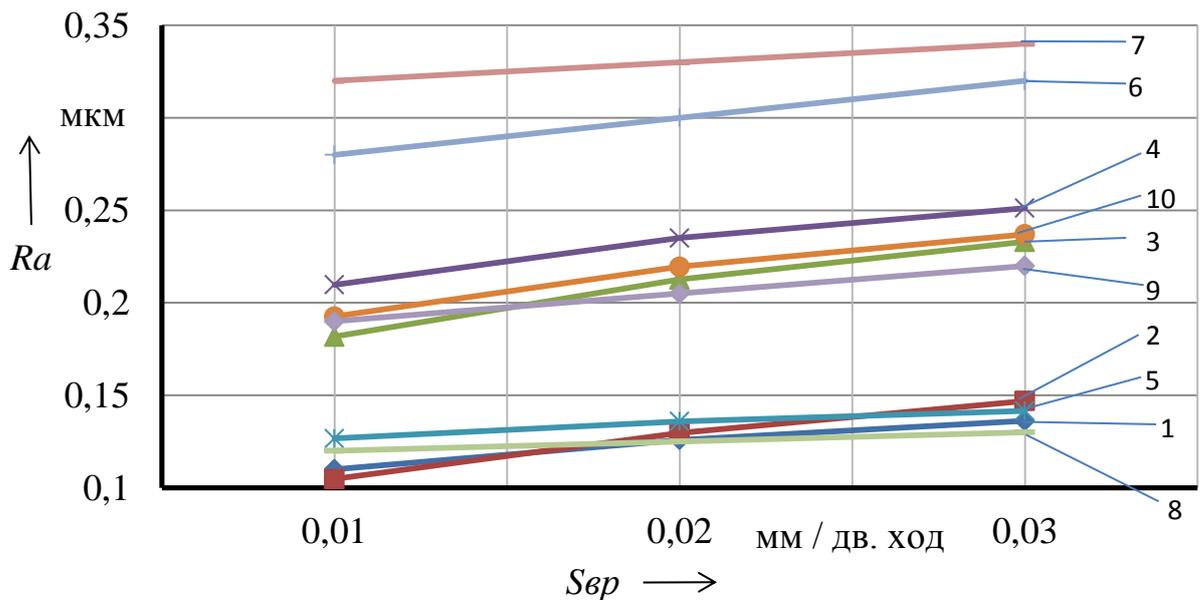


Рис. 3.16. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от врезной подачи  $S_{vp}$ , мм / дв. ход: круг - 1 300` 40` 76` 25A F46 Q 7 V A,  $V_{ст} = 15$  м/мин; 1 – 10 – составы ТСМ по табл. 2.1

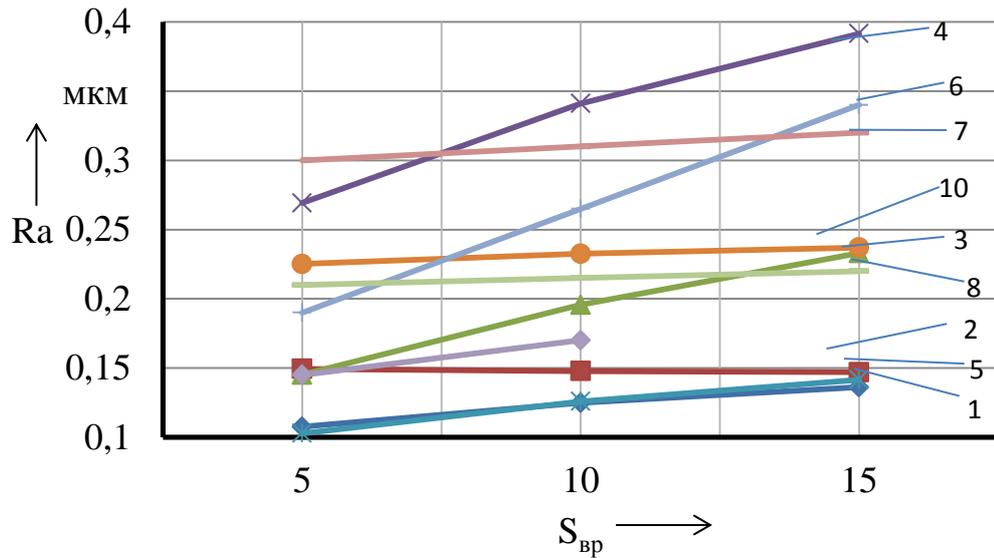


Рис. 3.17. Зависимость параметра шероховатости  $Ra$  от скорости стола  $V_{cm}$ : круг - 1 300` 40` 76` 25А F46 Q 7 V А,  $S_{ep} = 0,03$  мм/дв.ход; 1 – 10 – составы ТСМ по табл. 2.1

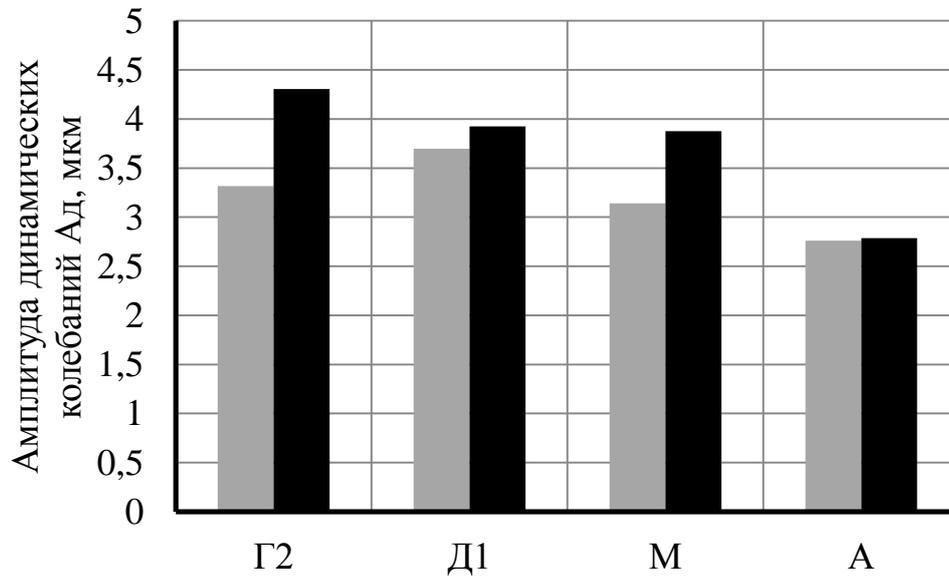


Рис. 3.18. Зависимость амплитуды динамических колебаний  $A_d$  шлифовального круга 1300` 40` 76` 25А F46 Q 7 V А от времени шлифования  $\tau$ : Г2 – А – составы ТСМ по табл. 2.1; ■ - время шлифования 1 мин; ■ - время шлифования 4,0 мин

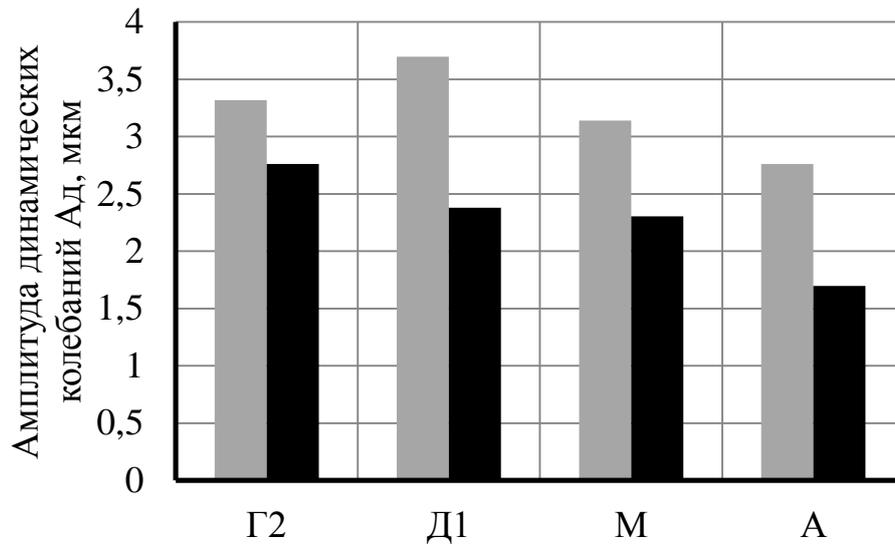


Рис. 3.19. Зависимость амплитуды динамических колебаний  $A_d$  от времени нанесения ТСМ (расхода ТСМ) в момент времени шлифования  $\tau = 1$  мин: Г2 – А – составы ТСМ по табл.2 1; ■ - время нанесения ТСМ 15 с; ■ - время нанесения ТСМ 30 с

Данные выводы справедливы для широкого круга режимов обработки. Оценивая влияние высокодисперсных наполнителей и наноприсадок на эффективность применения ТСМ следует выделить составы Г2, Д1, Д1А5, Г2М5. При их применении достигается наибольшее снижение шероховатости шлифованных поверхностей. По-видимому, в данном случае влияние оказывает комплекс таких факторов, как теплосиловой режим, формируемый в зоне шлифования, наличие в зоне шлифования шаржирующих элементов и другие факторы. Например, в состав Д1 входит высокодисперсный порошок диатомита, а в состав Г2 – высокодисперсный порошок глины, являющиеся твердыми компонентам, дополнительно шаржирующими обрабатываемую поверхность. Следует отметить, что введение в состав ТСМ одной и той же наноприсадки неоднозначно влияет на формирование шероховатости шлифованных поверхностей. Как видно из рис. 3.15 – 3.17, введение нанопорошка меди в состав Г2М5 (см. табл. 2.1) позволяет снизить высотные параметры шероховатости по сравнению с ТСМ с наполнителем из нанопорошка алюминия.

### 3.2.3. Влияние ТСМ с высокодисперсными материалами и антифрикционными наноприсадками на остаточные напряжения в поверхностном слое шлифованных деталей

В соответствии с методикой, приведенной в п. 3.1, проведено исследование влияния ТСМ на распределение остаточных напряжений  $\sigma_0$  по глубине поверхностного слоя шлифованных деталей. Результаты представлены на рис. 3.20, в табл. 3.12, а также в приложении Г.

Как видно из рис. 3.20, на глубине до 3 мкм наблюдаются остаточные напряжения сжатия, переходящие в дальнейшем в напряжения растяжения, наибольшая величина которых наблюдается на глубине 15 – 20 мкм. Анализируя результаты исследования распределения остаточных напряжений по глубине шлифуемой поверхности заготовки, следует отметить те же закономерности распределения остаточных напряжений, что и у других исследователей.

Например, как видно из рис. 3.21, Блурцян Р.Ш. и др. [60] получили аналогичную картину распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя шлифованной детали при бесцентровом шлифовании. Пик растягивающих остаточных напряжений также приходится на глубину 15 – 20 мкм.

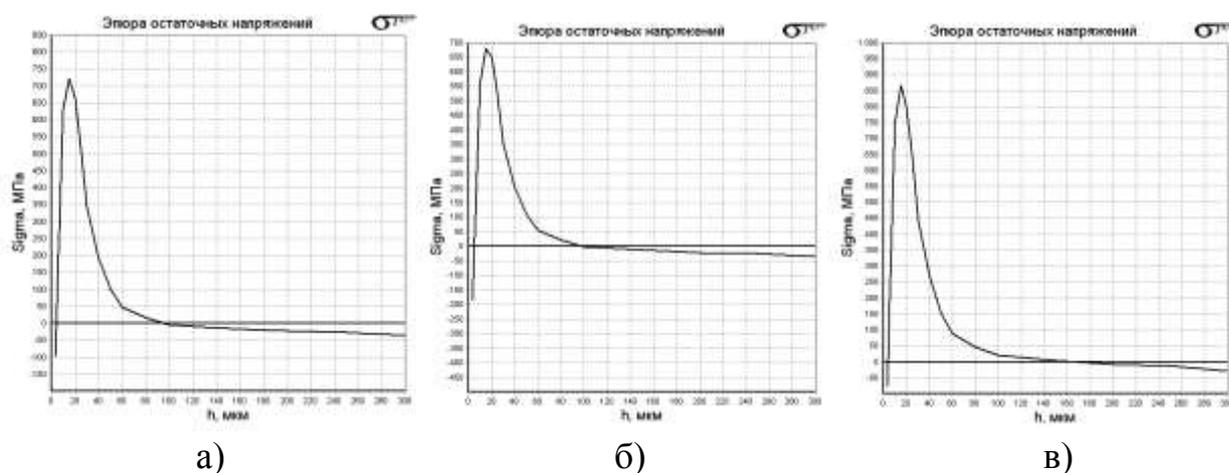


Рис. 3.20. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_0$  по глубине заготовки при шлифовании кругом КЗ с применением различных составов ТСМ: а – состав М1; б – состав Г2; в – Г2М5; режим шлифования:  $V_{cm} = 5$  м/мин;  $S_{BP} = 0,03$  мм/дв. ход;  $t = 0,15$  мм

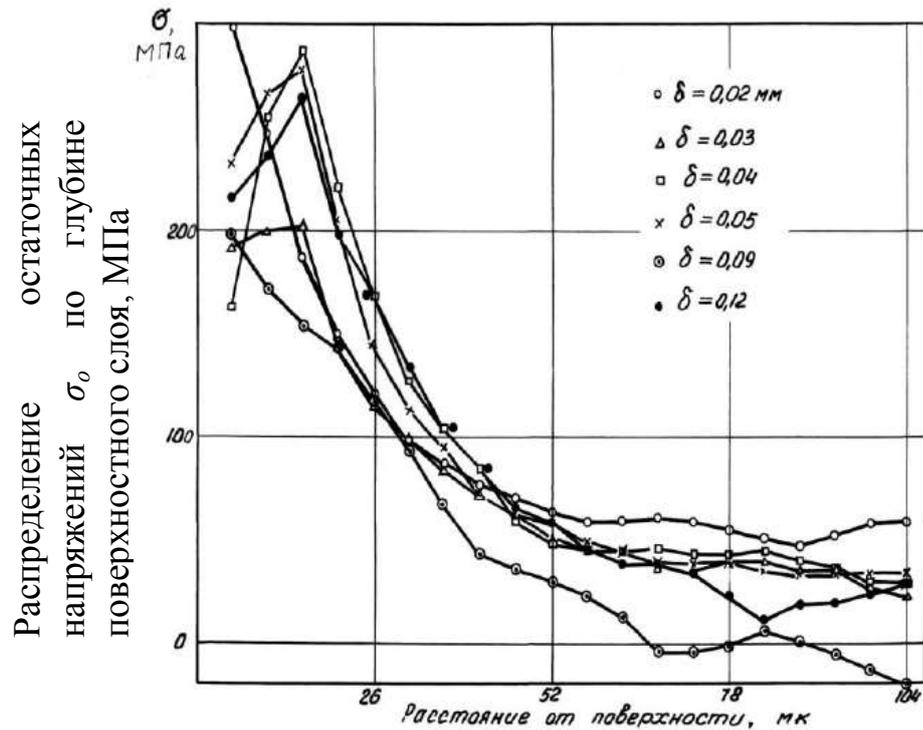


Рис. 3.21. Распределение тангенциальных остаточных напряжений  $\sigma$  по глубине поверхностного слоя  $\Delta a$  в зависимости от припуска на шлифование  $\delta$  [60]

Однако, при сравнении распределения остаточных напряжений по глубине шлифуемой заготовки, представленного на рис. 3.20 и 3.21, наблюдается некоторое расхождение. В первую очередь – это наличие напряжений сжатия на глубине до 3 – 5 мкм (рис. 3.20). Учитывая высокую теплонпряженность процесса шлифования, а также формирование максимальной температуры на минимальной глубине поверхностного слоя, непосредственно контактирующего с рабочей поверхностью ШК, наличие остаточных напряжений сжатия маловероятно. Вероятнее всего прибор СИТОН-АРМ на глубине до 3 – 5 мкм определяет остаточные напряжения со значительной погрешностью. Поэтому в дальнейших рассуждениях остаточные напряжения, формируемые на глубине от 3 до 5 мкм, не рассматривали.

Как следует из результатов проведенного исследования, наименьшее значение максимальны остаточных напряжений имеет место при шлифовании кругом КЗ при шлифовании кругом КЗ со скоростью стола 15 м/мин и врезной подачей 0,03 мм/дв.ход при применении состава Г2 и Г2М5

с наполнителем из высокодисперсного порошка голубой глины. При применении этих составов, по сравнению с со шлифованием с базовым составом М1 обеспечивается снижение максимальной величины остаточных напряжений до 24,5 %, по сравнению с базовым составом А – до 27,8 %.

Учитывая, что результирующая величина остаточных напряжений складывается из напряжений растяжения, вызванных воздействием контактной температуры, и напряжений сжатия, вызванных действием составляющих силы шлифования, то очевидно, наибольшая эффективность состава Г2 может быть объяснена наличием значительного градиента снижения теплонапряженности в зоне шлифования по сравнению с применением других испытанных составов ТСМ.

### **3.3. Производительность плоского шлифования периферией круга с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками**

Оценки влияния ТСМ с высокодисперсными материалами и антифрикционными наноприсадками на производительность плоского шлифования  $Q$  выполнили по изложенной ниже методике.

Производительность шлифования  $Q$  оценивали по формуле [61]:

$$Q = \frac{1}{t_0} = \frac{S_{вр} \cdot V_{ст}}{L \cdot Z}, \quad (3.22)$$

где  $t_0$  – основное время обработки заготовки, мин;  $V_{ст}$  – скорость стола, м/мин;  $S_{вр}$  – врезная подача, мм/дв.ход;  $L$  – длина пути пройденного ШК, м;  $Z$  – припуск, мм.

С учетом регрессионных зависимостей средней контактной температуры для различных составов ТСМ (Приложение Г,Д), итоговая формула для расчета производительности шлифования будет выглядеть следующим образом:

$$Q = S_{вр} \cdot \frac{\alpha \sqrt{\frac{T_k}{K_{ТСМ} \cdot S_{вр}^{\beta} \cdot F^{\gamma} \cdot S^{\delta}}}}{L \cdot Z}, \quad (3.23)$$

где  $T_k$  – средняя контактная температура в зоне шлифования, °С;  $K_{TSM}$  – коэффициент влияния ТСМ на среднюю контактную температуру в зоне шлифования;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – соответственно весовые коэффициенты влияния скорости стола  $V_{ст}$ , врезной подачи  $S_{вр}$ , зернистости ШК  $F$  и твердости ШК  $S$ .

Для каждого исследуемого состава ТСМ рассчитывали коэффициент повышения производительности  $K_{ПП}$  по формуле:

$$K_{ПП} = \left| \frac{Q_6 - Q_n}{Q_6} \right|, \quad (3.24)$$

где  $Q_6$  – производительность базового состава, шт/мин;  $Q_n$  – производительность проверяемого состава, шт/мин.

Результаты оценки производительности исследуемых составов ТСМ при шлифовании заготовки длиной  $L = 40$  мм из стали Р6М5 кругом 1 300' 40' 76' 25А F46 Q 5 V А за 1 проход с врезной подачей  $S_{вр} = 0,01 \dots 0,03$  мм/дв.ход приведены на рис. 3.22. В качестве базового состава использовали ТСМ М1.

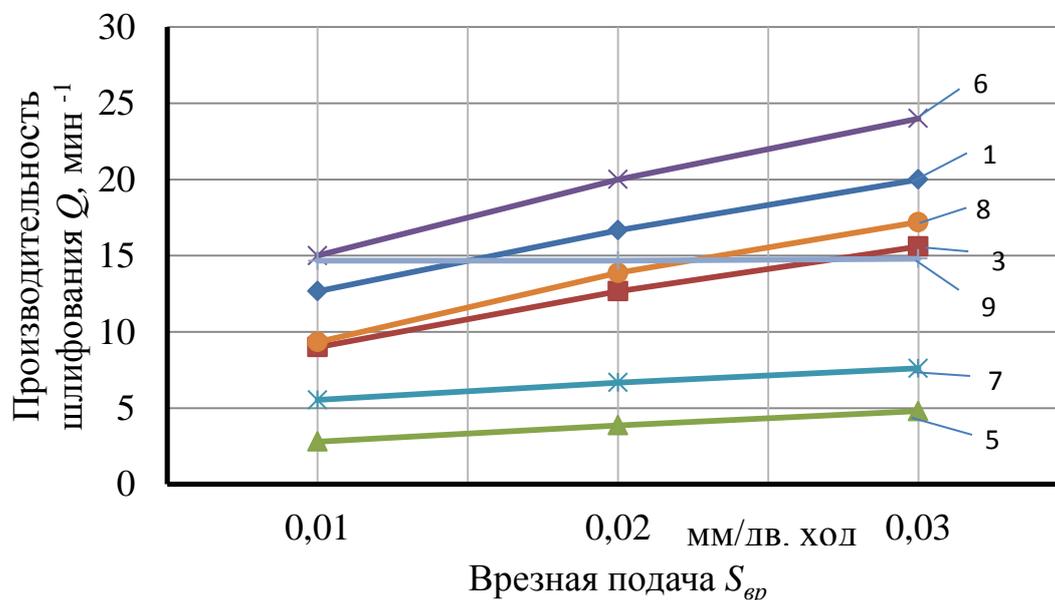


Рис. 3.22. Влияние ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на производительность плоского шлифования периферией круга: 1, 3 - 9 – составы ТСМ по табл. 2.1;  $V_{ст} = 15$  м/мин;  $T_k = 400$  °С; круг – К3 (см. табл. 3.2)

Как видно из рис. 3.22. с увеличением врезной подачи растет производительность плоского шлифования периферией круга. Оценивая

эффективность влияния высокодисперсных наполнителей и антифрикционных наноприсадок в составе ТСМ на повышение производительности шлифования можно заключить, что их применение оказывает существенное влияние на процесс шлифования. Например, введение в состав Г2 наноприсадки меди приводит к увеличению производительности до 15 %, а наноприсадки алюминия к уменьшению до 60 %. Это обусловлено различным влиянием испытанных наноприсадок на тепловые процессы в зоне шлифования (см. п. 3.2). С точки зрения технологической эффективности, наибольшее увеличение производительности в 5 – 5,3 раз отмечено при применении состава Г2М5.

### 3.4. Выводы

1. Доказана адекватность разработанных математических моделей. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений средней контактной температуры  $T_k$  в зоне шлифования и высотных параметров шероховатости шлифованных поверхностей не превышает 15 %, что свидетельствует о достаточно высокой степени соответствия предложенных математических моделей реальному процессу шлифования.
2. Показано, что наибольшее снижение средней контактной температуры при плоском шлифовании периферией круга обеспечивает состав ТСМ с наполнителем из высокодисперсного порошка голубой глины и антифрикционной наноприсадкой из порошка меди (состав Г2М5, табл. 2.1) – до 20... 25 % по сравнению с базовыми составами М1 и А.
3. Установлено, что среди всех испытанных составов ТСМ наибольшее снижение высотных параметров шероховатости до 15 – 20 % по сравнению с базовыми составами М1 и А наблюдается при применении состава Г2, в качестве наполнителя в котором использован высокодисперсный порошок голубой глины.
4. Показано, что среди всех испытанных составов ТСМ наименьшая максимальная величина остаточных напряжений при шлифовании кругом К3

со скоростью стола 15 м/мин и врезной подачей 0,03 мм/дв.ход наблюдается при применении состава Г2 и Г2М5. По сравнению с базовым составом М1, при шлифовании в тех же условиях, обеспечивается снижение максимальной величины остаточных напряжений до 24,5 % по сравнению с базовым составом А – до 27,8 %.

5. Приведена сравнительная оценка производительности плоского шлифования периферией круга при применении 8 составов ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками. Показано, что наибольшее повышение производительности (до трех раз) имеет место при применении состава Г2М5 с высокодисперсным порошком голубой глины и нанопорошком меди.

## **ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1. Результаты опытно-промышленных испытаний ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками**

Опытно-промышленные испытания проводили в условиях действующих производств ООО «ДИЗ» («Димитровградский инструментальный завод», г. Димитровград) и ООО «Сервис-Газ» (г. Ульяновск) на операциях заточки РИ из быстрорежущей стали, в ООО «Автопромэко» (г. Ульяновск) на операции шлифования матриц и пуансонов из стали Х12М. Акты опытно-промышленных испытаний приведены в приложение К. Основные результаты представлены в табл. 4.1.

В производственных условиях ООО «ДИЗ» шлифовали двухсторонние фрезы 2200-5040 из стали Р6М5 и трехсторонние фрезы 2240-5032 из стали Р6М5К5 шлифовальными кругами 25AF60 L 7V и 25AF150K 7V.

По результатам опытно-промышленных испытаний в ООО «ДИЗ» установлено, что наибольшую эффективность при заточке фрез из быстрорежущей стали Р6М5 показал состав Д1 на основе высокодисперсного порошка диатомита. Базовый состав М1 также имеет высокие показатели эффективности, однако при шлифовании с применением данного состава наблюдался его значительный расход. Состав на основе глины и графита показал низкую эффективность, кроме того загрязнял обрабатываемую поверхность. Исходя из вышесказанного, состав Д1 рекомендован ООО «ДИЗ» к применения на операциях черного и чистового шлифования лезвийного инструмента.

По результатам опытно-промышленных испытаний в ООО «Сервис-Газ» установлено, что наибольшую эффективность при заточке фрез из быстрорежущей стали Р6М5 показал состав Д1М5 с наполнителем на основе высокодисперсного порошка диатомита, модифицированного нанопорошком меди. Базовый состав М1 также имеет высокие показатели эффективности,

однако при шлифовании с применением этого состава наблюдался значительный расход ТСМ. Исходя из вышесказанного, состав Д1М5 рекомендован ООО «Сервис-Газ» к применению на операции черного и чистового шлифования лезвийного инструмента.

В производственных условиях ООО «Автопромэко» шлифовали матрицы и пуансоны из стали Х12М шлифовальными кругами 25АF40 L 6V50.

Таблица 4.1

## Основные результаты опытно-промышленных испытаний

Предприятие	Вид обработки	Результаты опытно-промышленных испытаний
1	2	3
ООО «ДИЗ»	Заточка фрезы двухсторонней из быстрорежущей стали Р6М5; заточка фрезы трехсторонней из быстрорежущей стали Р6М5К5; шлифовка торцев электродов из Д16; заточка резцов призматических из М1	Наибольшую эффективность показали составы Д1,Г2,М1, которые рекомендованы к применению. Составы с наполнителями на основе графита не рекомендованы к применению, так как пачкают обрабатываемую поверхность заготовки.
ООО «Сервис-Газ»	Заточка фрез из быстрорежущей стали Р6М5	Наибольшую эффективность показал состав Д1М5, который рекомендован к применению. При его использовании наблюдали увеличение стойкости фрез на 10 % по сравнению с базовым составом М1.
ООО «Автопромэко»	Шлифование матриц и пуансонов из Х12М	Наибольшую эффективность показали составы Г2 и Г2М5 обеспечивающие снижение шероховатости матриц и пуансонов до 25% и увеличение стойкости ШК до 3-х раз.

По результатам опытно-промышленных испытаний в ООО «Автопромэко» установлено, что наибольшую технологическую эффективность имеет состав Г2 и Г2М5. Также значительную эффективность имеют составы Д1 и Д1М5. По сравнению с базовой технологией без применения ТСМ, предложенная технология с применением вышеуказанных составов показала увеличение стойкости шлифуемых матриц и пуансонов в 2,5 ... 3 раза при снижении шероховатости до 25%.

Таким образом, результаты опытно-промышленных испытаний подтвердили выводы, сделанные по результатам натурального эксперимента. Составы Г2, Г2М5, Д1М5, показавшие в ходе лабораторных испытаний наибольшую технологическую эффективность с точки зрения снижения средней контактной температуры  $T_k$  и высотных параметров шероховатости шлифованных поверхностей, имели более высокие технологические показатели по сравнению с базовыми составами М1 и А при проведении опытно-промышленных испытаний в условиях действующих производств ООО «ДИЗ», ООО «Сервис-Газ» и ООО «Автопромэко».

## **4.2. Рекомендации и технология применения твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции плоского шлифования**

### **4.2.1. Область применения технологического регламента**

Настоящий технологический регламент устанавливает требования к промышленному применению ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками в целях защиты жизни и здоровья работников предприятий, использующих ТСМ в производственных целях, окружающей среды, а также ресурсосбережения.

Настоящий технологический регламент распространяется на:

а) ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, разработанными в ходе диссертационного исследования;

б) отработанные ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

#### **4.2.2. Применение ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками**

Технология шлифования с применением ТСМ включает в себя следующие этапы: правку рабочей поверхности ШК; нанесение слоя ТСМ на рабочую поверхность ШК; контроль качества нанесенного слоя ТСМ; шлифование заготовки; периодический контроль качества нанесенного слоя ТСМ; повторное нанесение слоя ТСМ.

При выборе состава предпочтение следует отдавать ТСМ содержащим 50 – 70% по массе высокодисперсного наполнителя (порошки голубой глины и диатомита), (0,5 – 1,0%) (по массе) наноприсадок металлов обладающих антифрикционным действием и имеющим размер частиц менее 100 нм (нанопорошок меди), остальное – связующее. При выборе связующее необходимо руководствоваться известными рекомендациями [...]. Толщину смазочного слоя на поверхности ШК рекомендуется определять исходя из условия:  $H_{д.з.}^{max} < t_{тс} < H_{реж.}^{min}$ , характеризующим рабочую поверхность шлифовального круга. Периодичность обновления слоя ТСМ на рабочей поверхности ШК можно определить по формуле (2.7).

Стойкость смазочного слоя ТСМ и периодичность его обновления следует определять экспериментальным путем.

Для предварительного шлифования рекомендуется использовать составы обеспечивающие максимальное снижение теплосилового напряжения. Наиболее целесообразно в этом случае применять составы содержащие высокодисперсные наполнители и антифрикционные наноприсадки (Г2М5, Д1М5 и др). Для окончательного шлифования следует использовать составы на основе высокодисперсных наполнителей (Г2, Г5, Д1

и др.) обеспечивающих высокое качество поверхностного слоя обрабатываемых заготовок.

#### **4.2.3. Требования по промышленной, пожарной и экологической безопасности при применении ТСМ на операциях шлифования**

Основными опасными факторами (рисками), возникающими при использовании (эксплуатации) и переработке (утилизации) ТСМ, являются: пожаровзрывоопасность ТСМ; экологическое воздействие отработанных ТСМ при попадании их компонентов в окружающую среду; вредное воздействие на организм человека.

В состав ТСМ входят наноприсадки (нанопорошки алюминия и меди) и связующее (парафин), являющиеся пожароопасными веществами классов D1 и B1 соответственно по ГОСТ 27331.

Для обеспечения пожарной безопасности при применении ТСМ требуется соблюдать нормы пожарной безопасности (НБП) 166-97, 01-03, а также следующие меры по ГОСТ 23683:

1. ТСМ являются горючими веществами с температурой вспышки не ниже 160 °С, температурой самовоспламенения не ниже 300 °С.

2. ТСМ относятся к 4-му классу опасности по ГОСТ 12.1.007. Предельно допустимая концентрация паров углеводородов расплавленного парафина в воздухе рабочей зоны составляет 300 мг/м<sup>3</sup> в пересчете на углерод. Поэтому конструкция вытяжных устройств (шкафов, окрасочных, сушильных камер и т. д.), аппаратов и трубопроводов должна предотвращать накопление пожароопасных отложений и обеспечивать возможность их очистки пожаробезопасными способами. Работы по очистке должны проводиться согласно технологическим регламентам и фиксироваться в журнале.

3. При необходимости удаление отложений парафина возможно в соответствии с РД 39-23-954.

4. ТСМ пожароопасны. В помещении для хранения и эксплуатации ТСМ запрещается обращение с открытым огнем: искусственное освещение должно быть во взрывобезопасном исполнении.

5. Запрещается подвергать ТСМ воздействию открытого огня. При загорании ТСМ при малом очаге пожара следует применять следующие средства пожаротушения: огнетушители марки ОП-10, сухой песок, ковшу; при значительном очаге – пожаропенные огнетушительные установки.

6. При необходимости плавления и формообразования ТСМ с применением теплового воздействия необходимо соблюдать правила пожарной безопасности, а также осуществлять непосредственный контроль процесса специально обученному персоналу. При разливе расплавленного ТСМ на открытой площадке по истечении некоторого времени необходимо тщательно удалить застывшую массу и место разлива засыпать песком.

7. При применении ТСМ необходимо использовать индивидуальные средства защиты в соответствии с типовыми отраслевыми правилами, утвержденными в установленном порядке.

8. При работе с расплавленным ТСМ следует соблюдать необходимые меры предосторожности, так как попадание расплавленного ТСМ на кожные покровы может вызвать ожог.

Основная часть компонентов ТСМ с наполнителями из высокодисперсных и наноматериалов (металлы, глина, диатомит) являются экологически и промышленно безопасными материалами, однако в состав ТСМ входит парафин, который при определенных обстоятельствах может негативным образом влиять на здоровье человека.

С точки зрения обеспечения экологической и промышленной безопасности необходимо принимать следующие меры:

1. При применении ТСМ важно соблюдать правила пожарной безопасности, а также обеспечить работу вытяжных устройств, аппаратов и трубопроводов для предотвращения накопления паров и аэрозолей связующего, выделяющихся в процессе шлифования, необходимо применять

индивидуальные средства защиты в соответствии с типовыми отраслевыми правилами, утвержденными в установленном порядке.

2. При попадании расплавленного ТСМ на кожу возможно появление тепловых ожогов. При появлении теплового ожога, поврежденное место необходимо обильно смочить водой и обратиться в медицинский пункт для оказания помощи.

3. Прием ТСМ внутрь запрещен.

### **4.3. Средства автоматизированной подачи ТСМ**

Для обеспечения возможности автоматизированного формирования слоя ТСМ на рабочей поверхности ШК разработаны конструкции устройств для автоматизированного нанесения ТСМ контактным (рис. 4.1) или бесконтактным способами (рис. 4.2).

В автоматизированном устройстве (рис. 4.1) ТСМ вводится в контакт с рабочей поверхностью ШК с помощью пневмоцилиндра одностороннего действия, поршень 3 которого перемещается в направлении рабочей поверхности ШК под действием сжатого воздуха, который подается в цилиндр через отверстие в крышке 6 системой подачи и подготовки сжатого воздуха (обратный клапан 10, дросель 11, реле давления 12, маслораспылитель 13, регулятор давления 14, фильтр 15). В обратном направлении поршень 3 перемещается под действием пружины 2.

Для отдельного или одновременного нанесения на рабочую поверхность ШК двух разных по составу ТСМ устройство оснащено двумя пневмоцилиндрами, управление последовательностью работы которых осуществляется распределителем 4.

Устройство для подачи ТСМ бесконтактным способом (рис. 4.2) содержит: сопло 6 для распыления ТСМ, нагреватель 5, установленный на встроенные центрично расположенные трубки 3 и 4. Нагреватели 11 встроены

в баки для ТСМ 1 и ТСМ 2. В устройстве нагрева встроены терморегулятор 10 и датчик температуры 9.

Работа устройства для нанесения ТСМ распылением осуществляется следующим образом. Перед началом работы в баки 1 и 2 закладывают ТСМ 1 и ТСМ 2, затем подают напряжение на нагреватели 11. Терморегулятором 10 устанавливают температуру плавления связующего ТСМ 1 и ТСМ 2. Например, для парафина  $t_{пл} = 54\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Контроль температуры осуществляют с помощью датчика 9. После перехода связующего в расплавленное состояние подают напряжение на нагреватель 5, температура которого превышает температуру плавления связующего. Затем подают сжатый воздух через фильтр 17, регулятор давления 16, маслораспылитель 15, реле давления 14, дросель 12 и манометр 11. Под действием давления, создаваемого пневмосистемой, ТСМ через трубку 4, расположенную в баках 1 и 2 начинает подниматься по трубе 3, где под действием воздуха попадает в сопло и распыляется на рабочей поверхности ШК.

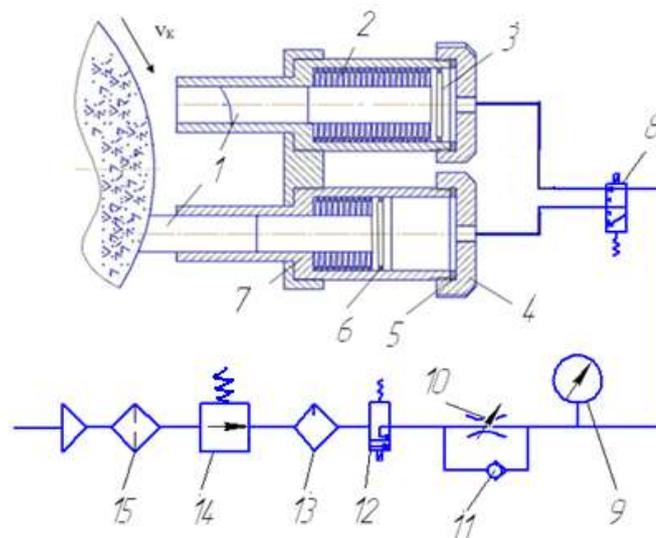


Рис. 4.1. Автоматизированное устройство для нанесения ТСМ контактным способом

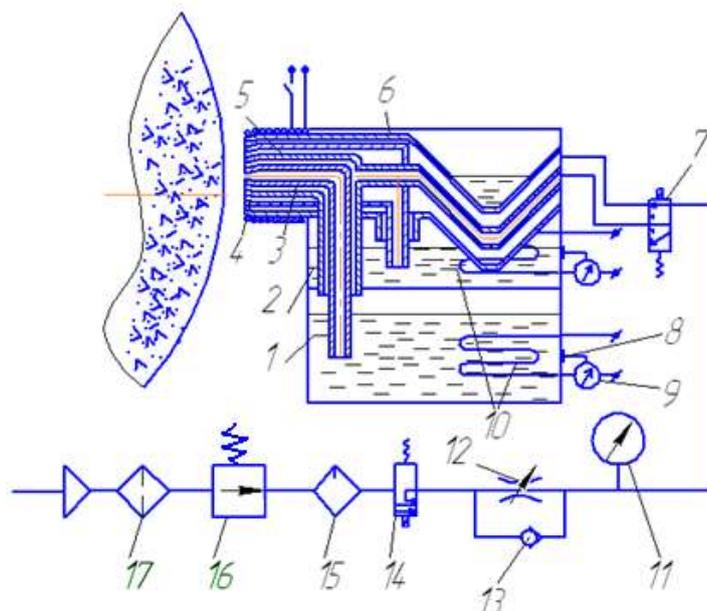


Рис. 4.2. Принципиальная схема устройства для нанесения ТСМ бесконтактным способом: 1 – бак для ТСМ 1; 2 – бак для ТСМ 2; 3, 4 – трубки; 5 – нагреватель; 6 – трубка; 7 – распределитель; 8 – датчик температуры; 9 – терморегулятор; 10 – нагревательный элемент; 11 – манометр; 12 – дросель; 13 – редукционный клапан; 14 – реле давления; 15 – маслораспылитель; 16 – регулятор давления; 17 – фильтр

#### 4.4. Техничко-экономические показатели операций плоского шлифования с применением твердых смазочных материалов с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками

##### 4.4.1. Методика расчета экономического эффекта

Эффективность применения ТСМ на операции плоского шлифования обусловлена, в основном, следующими факторами: а) повышением производительности обработки за счет интенсификации режима обработки и увеличения периода стойкости ШК (соответствующего уменьшения числа правок); б) сокращением расхода ШК и правящих инструментов.

При расчете суммарного годового экономического эффекта, получаемого от применения ТСМ на операции плоского шлифования, использовали зависимость:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4, \quad (4.1)$$

где  $\mathcal{E}_1$  – годовая экономия фонда заработной платы рабочего за счет интенсификации режима шлифования, руб.;  $\mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \mathcal{E}_4$  – годовая экономия, получаемая за счет сокращения соответственно расходов на эксплуатацию шлифовального станка; ШК; потребности в РИ, шлифованных с применением ТСМ, увеличения их работоспособности, руб.

Годовая экономия фонда заработной платы заточника [62]

$$\mathcal{E}_1 = 1,53 \cdot C_{mc} \cdot (T_{ук}^{\delta} \cdot \Pi_2^{\delta} - T_{ук}^{ТСМ} \cdot \Pi_2^{ТСМ}) \cdot (N_n + 1), \quad (4.2)$$

где  $C_{mc}$  – часовая тарифная ставка рабочего, руб./ч;  $T_{ук}^{cm}, T_{ук}^{ТСМ}$  – штучно-калькуляционное время на заточку РИ соответственно без применения и с применением ТСМ с наполнителями из высокодисперсных наноматериалов, ч;  $\Pi_2^{\delta}, \Pi_2^{ТСМ}$  – годовая потребность в РИ, заточенных соответственно без применения и с применением ТСМ, шт;  $N_n$  – число допустимых переточек РИ.

В случае увеличения периода стойкости РИ, заточенного с применением ТСМ, годовую потребность в инструменте рассчитывают по формуле:

$$\Pi_2^{ТСМ} = \Pi_2^{\delta} \cdot k^{\delta}, \quad (4.3)$$

где  $k^{\delta}$  – коэффициент, учитывающий увеличение периода стойкости инструмента, заточенного с применением ТСМ, по сравнению с инструментом, заточенным без применения ТСМ:

$$k_{cm} = \tau_c^1 / \tau_c^2, \quad (4.4)$$

где  $\tau_c^1, \tau_c^2$  – соответственно период стойкости РИ, обработанного соответственно без применения и с применением ТСМ, ч.

Штучно-калькуляционное время операции шлифования, выполняемой на станке с возвратно-поступательным движением стола,

$$T_{шк} = \left( T_o + T_{зо} + \frac{T_{np}}{\tau_q} + \frac{T_{зк}}{\tau_k} + T_\delta \right), \quad (4.5)$$

где  $T_o$  – машинное время операции шлифования, ч;  $T_{зо}$  – время подвода, отвода, ориентации и замены РИ, ч;  $T_{np}$  – время, затрачиваемое на правку ШК, ч;  $\tau_q$  – стойкостная наработка ШК, выражаемая количеством РИ, обработанных кругом до появления прижога, шт;  $T_{зк}$  – время, отведенное на замену изношенного ШК, ч;  $\tau_k$  – суммарный период стойкости ШК, выражаемый количеством обработанных кругом РИ за весь период эксплуатации, шт;  $T_\delta = 0,05 \cdot T_o$  – время на отдых, ч.

Машинное время операции шлифования:

$$T_o = \frac{(L_1 + L_2 + L_3) \cdot t_\phi}{60 \cdot 500 \cdot V_{cm} \cdot S_{ep}}, \quad (4.6)$$

где  $L_1, L_2$  – соответственно недобег, перебег ШК, мм,  $L_3$  – длина рабочего хода, мм;  $t_\phi$  – припуск, снимаемый при обработке, мм;  $V_{cm}$  – скорость стола, м/мин;  $S_{ep}$  – врезная подача, мм/дв.х.

Годовая экономия за счет сокращения расходов на эксплуатацию шлифовального станка

$$\mathcal{E}_2 = C_{мчз} \cdot (T_o^\delta \cdot \Pi_z^\delta - T_o^{TSM} \cdot \Pi_z^{TSM}) \cdot (N_n + 1), \quad (4.7)$$

где  $C_{мчз}$  – себестоимость машино-часа шлифовального станка, руб./ч;  $T_o^\delta$ ,  $T_o^{TSM}$  – соответственно машинное время шлифования соответственно без применения и с применением ТСМ, ч.

Годовая экономия затрат по абразивному инструменту

$$\mathcal{E}_3 = \left( \frac{(C_u^\delta - P_u^\delta) \cdot K_{y\delta}^\delta}{\tau_k^\delta} \cdot \Pi_z^\delta - \frac{(C_u^{TSM} - P_u^{TSM}) \cdot K_{y\delta}^{TSM}}{\tau_k^{TSM}} \cdot \Pi_z^{TSM} \right) \cdot (N_n + 1), \quad (4.8)$$

где  $C_u^\delta$ ,  $C_u^{TSM}$  – стоимость ШК соответственно без применения и с применением ТСМ, руб.;  $P_u^\delta$ ,  $P_u^{TSM}$  – выручка от реализации изношенного

ШК, руб.;  $\kappa_{уб}^{\delta}$ ,  $\kappa_{уб}^{TSM}$  – коэффициент, учитывающий случайную убыль ШК соответственно с применением и без применения ТСМ.

Годовая экономия за счет повышения работоспособности ШК

$$\mathcal{E}_4 = (\Pi_z^{\delta} - \Pi_z^{TSM}) \cdot C_{pu}, \quad (4.9)$$

где  $C_{pu}$  – стоимость ШК, руб.

#### **4.4.2. Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения ТСМ на операции заточки концевых фрез из стали Р6М5 в действующем производстве ООО «Сервис–Газ»**

В качестве примера ниже приведен расчет экономического эффекта от применения ТСМ на операции заточки концевых фрез из стали Р6М5 в ООО «Сервис–Газ» (г. Ульяновск). Исходные данные для расчета представлены в табл. 4.2. Фрезы затачивали без применения СОЖ на станке 3Е642Е. В качестве ТСМ применяли состав Д1М5, содержащий в качестве наполнителя порошок диатомита и в качестве присадки нанопорошок меди, хорошо зарекомендовавший себя во время опытно-промышленных испытаний. Заточка фрез с применением ТСМ позволяет в 2,0 раза увеличить бесприжоговую врезную подачу по сравнению с заточкой по базовой технологии. При этом среднее арифметическое отклонение профиля обработанных поверхностей фрез  $Ra$  и стойкостная наработка круга остаются практически на том же уровне, что и при заточке по базовой технологии. Вместе с тем, было зафиксировано увеличение в 1,1 раза периода стойкости фрез, заточенных с применением ТСМ, по сравнению с заточенными без применения ТСМ.

Таблица 4.2

Исходные данные для расчета экономического эффекта от применения  
ТСМ

Наименование показателя	Варианты	
	Базовый*	Предлагаемый**
1. Годовая потребность в концевых фрезах, шт	1500	1363
2. Продольная подача, м/мин	7	
3. Врезная подача, мм/дв.х	0,02	0,04
4. Количество обрабатываемых поверхностей фрез	6	
5. Припуск, снимаемый с обрабатываемой поверхности, мм	0,4	
6. Длина обрабатываемой поверхности (ленточки), мм	50	
7. Коэффициент повышения стойкости РИ	1,1	
8. Стойкостная наработка ШК, шт	4	6
9. Суммарный период стойкости ШК, шт	842	1218
10. Себестоимость машино-часа заточного станка, руб./ч	1000	
11. Часовая тарифная ставка заточника, руб./ч	160	
12. Стоимость шлифовального круга, руб.	700	700
13. Количество допустимых переточек концевой фрезы	4	
14. Стоимость концевой фрезы, руб.	700	

Примечание: \* - без ТСМ; \*\* - с применением состава Д1М5 (см. табл. 2.1).

Заточка фрез с применением ТСМ позволяет в 2,0 раза увеличить бесприжоговую врезную подачу по сравнению с заточкой по базовой технологии. При этом среднее арифметическое отклонение профиля обработанных поверхностей фрез  $Ra$  и стойкостная наработка круга остаются практически на том же уровне, что и при заточке по базовой технологии. Вместе с тем, было зафиксировано увеличение в 1,1 раза периода стойкости фрез, заточенных с применением ТСМ, по сравнению с заточенными без применения ТСМ.

1. Машинное время операции заточки по базовой технологии и с применением ТСМ

$$T_o^{\bar{\sigma}} = \frac{n \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \cdot t_{\phi}}{60 \cdot 500 \cdot S_{np}^{\bar{\sigma}} \cdot S_{\bar{\sigma}}^{\bar{\sigma}}} = \frac{6 \cdot (10 + 50 + 10) \cdot 0,4}{60 \cdot 500 \cdot 7 \cdot 0,02} = 0,04 \text{ ч.}$$

$$T_o^{TCM} = \frac{n \cdot (L_1 + L_2 + L_3) \cdot t_{\phi}}{60 \cdot 500 \cdot S_{np}^{TCM} \cdot S_{\bar{\sigma}}^{TCM}} = \frac{6 \cdot (10 + 50 + 10) \cdot 0,4}{60 \cdot 500 \cdot 7 \cdot 0,04} = 0,02 \text{ ч.}$$

2. Штучно-калькуляционное время заточки инструмента без применения и с применением ТСМ ( $T_{зо} = 2,5$  мин;  $T_{np} = 1,5$  мин;  $T_{зк} = 2$  мин)

$$T_{шк}^{\bar{\sigma}} = \left( T_o^{cm} + T_{зо} + \frac{T_{np}}{\tau_q^{\bar{\sigma}}} + \frac{T_{зк}}{\tau_{\kappa}^{\bar{\sigma}}} + T_{\delta} \right) =$$

$$= \left( 0,040 + 0,0417 + \frac{0,025}{4} + \frac{0,033}{842} + 0,002 \right) = 0,088 \text{ ч.}$$

$$T_{шк}^{TCM} = \left( T_o^{TCM} + T_{зо} + \frac{T_{np}}{\tau_q^{TCM}} + \frac{T_{зк}}{\tau_{\kappa}^{TCM}} + T_{\delta} \right) =$$

$$= \left( 0,020 + 0,0417 + \frac{0,0250}{6} + \frac{0,0333}{1218} + 0,001 \right) = 0,067 \text{ ч.}$$

3. Годовая экономия фонда заработной платы заточника

$$\mathcal{E}_1 = 1,53 \cdot C_{мс} \cdot (T_{шк}^{\bar{\sigma}} \cdot \Pi_2^{\bar{\sigma}} - T_{шк}^{TCM} \cdot \Pi_2^{TCM}) \cdot (N_n + 1) =$$

$$= 1,53 \cdot 160 \cdot (0,088 \cdot 1500 - 0,067 \cdot 1363) \cdot (4 + 1) = 4979106 \text{ руб.}$$

4. Годовая экономия за счет сокращения расходов на эксплуатацию заточного станка

$$\mathcal{E}_2 = C_{мчз} \cdot (T_o^{\bar{\sigma}} \cdot \Pi_2^{\bar{\sigma}} - T_o^{TCM} \cdot \Pi_2^{TCM}) \cdot (N_n + 1) =$$

$$= 1000 \cdot (0,040 \cdot 1500 - 0,020 \cdot 1363) \cdot (4 + 1) = 16353785 \text{ руб.}$$

## 5. Экономия затрат по АИ

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_3 &= \left( \frac{(C_u^\delta - P_u^\delta) \cdot K_{y\delta}^\delta}{\tau_k^\delta} \cdot \Pi_z^\delta - \frac{(C_u^{TSM} - P_u^{TSM}) \cdot K_{y\delta}^{TSM}}{\tau_k^{TSM}} \cdot \Pi_z^{TSM} \right) \cdot (N_n + 1) = \\ &= \left( \frac{(700 - 0,01) \cdot 1,3}{842} \cdot 1500 - \frac{(707 - 0,01) \cdot 1,3}{1218} \cdot 1363 \right) \cdot (4 + 1) = 2963,07 \text{ руб.} \end{aligned}$$

## 6. Экономия по РИ

$$\mathcal{E}_4 = (\Pi_z^\delta - \Pi_z^{TSM}) \cdot C_{pu} = (1500 - 1363) \cdot 700 = 95900 \text{ руб.}$$

7. Годовой экономический эффект от внедрения ТСМ с на операции заточки концевых фрез из стали Р6М5:

$$\mathcal{E} = 49791,06 + 163537,85 + 2963,07 + 95900 = 312191,98 \text{ руб.}$$

#### 4.5. Выводы

Анализ результатов опытно-промышленных испытаний и оценка технико-экономической эффективности применения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании периферией круга привели к следующим результатам:

- составы ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками в условиях действующих производств позволяют повысить эффективность процесса «сухого» шлифования;

- для повышения производительности обработки и качества поверхностей деталей, шлифованных с использованием ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, следует воспользоваться технологическими регламентами и рекомендациями по применению, изложенными в п.4.2;

– для автоматизации процесса шлифования с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками можно рекомендовать устройства для автоматической подачи ТСМ в твердом или жидком агрегатных состояниях на рабочую поверхность ШК, предложенные в п.4.3;

– для расчета показателей технологической эффективности процесса шлифования при применении разработанных в ходе диссертационного исследования ТСМ с высокодисперсными наполнителями антифрикционными наноприсадками получены регрессионные зависимости, приведенные в приложениях Л, М и О;

– результаты опытно-промышленных испытаний, проведенные в ООО «ДИЗ» (г. Димитровград), ООО «Сервис-Газ» (г. Ульяновск) и ООО «Автопромэко» (г. Ульяновск) на операциях плоского шлифования деталей матриц и пуансонов из стали Х12М, заточки РИ из стали Р6М5 подтвердили, что применение ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками увеличивают производительность бездефектного шлифования до 30%, повышают качество шлифованных поверхностей до 25%, повышают экологическую безопасность операций шлифования деталей и заточки РИ;

– ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции заточки фрез из быстрорежущей стали Р6М5 в ООО «Сервис Газ» (г. Ульяновск) составил в среднем 312191,98 руб.;

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных теоретико-экспериментальных исследований получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Доказана эффективность применения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операциях плоского шлифования заготовок деталей.
2. Разработана теплофизическая модель плоского шлифования периферией ШК с применением ТСМ, позволяющая рассчитать среднюю контактную температуру для широкого диапазона условий.
3. Разработана ММ высотных параметров шероховатости поверхностей заготовок деталей, шлифованных с применением ТСМ, учитывающая влияние расхода ТСМ на динамическую разновысотность а.з. рабочей поверхности ШК.
4. Получены регрессионные зависимости средней контактной температуры, составляющих сил шлифования и шероховатости, учитывающие основные технологические факторы и позволяющие прогнозировать эффективность плоского шлифования периферией круга с применением ТСМ.
5. Подтверждена адекватность разработанных аналитических и числовых моделей и регрессионных зависимостей в лабораторных и промышленных условиях при применении опытных партий карандашей твердой смазки, изготовленных из разработанных ТСМ.
6. Экспериментально установлено, что наибольшее снижение теплосиловой напряженности наблюдается при применении ТСМ с высокодисперсным наполнителем из голубой глины и наноприсадки из порошка меди. Снижение средней контактной температуры составило 20 – 25 % по сравнению с базовыми составами ТСМ. Наибольшее снижение шероховатости и величины остаточных напряжений до (15 – 20 %) наблюдается при применении состава с наполнителем из высокодисперсного порошка голубой глины (состав Г2).

7. Разработан оригинальный состав ТСМ (патент РФ 2531587) и спроектированы оригинальные устройства для нанесения ТСМ на рабочую поверхность ШК.
8. Разработаны технологические рекомендации по применению ТСМ, позволяющие в зависимости от условий шлифования осуществить выбор состава ТСМ и разработать технологию шлифования с учетом их применения.
9. Результаты опытно-промышленных испытаний ТСМ в действующем производстве (ООО «ДИЗ», ООО «Автопромэко», ООО «Сервисгаз»), показали, что применение ТСМ обеспечивает повышение качества шлифованных поверхностей до 25%, увеличение стойкости затачиваемого инструмента до 10%, увеличение стойкости используемых ШК до 3-х раз.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ефимов В. Н. Совершенствование рабочих процессов технологии, методов обработки резанием – важнейший резерв машиностроения. / Ефимов В. Н., Подураев В. Н. // Вестник машиностроения. – 1990. – №12. – С. 3 – 5.
2. Соколов Б. Н. На пленуме ЦП ВНТО машиностроителей – вопрос чрезвычайной важности // Вестник машиностроения. – 1990. – №10. – С. 3 – 5.
3. Резание с ограниченным применением смазочно-охлаждающей жидкости. Сайт: <http://www.vtool.ru/anl/ito0405-cotc.pdf>
4. Худобин Л. В. Шлифование композиционными кругами / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов – Ульяновск: УлГТУ. – 2004. – 256 с.
5. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник/ Под общей ред. С. Г. Энтелиса, Э. М. Берлинера. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. – 1995. – 496 с.; ил.
6. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабичев, Е. М. Булыжев и др. / Под общ.ред. Л. В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006 – 544 с.; ил.
7. Каталог металлорежущего инструмента. Сайт: <http://www.s-t-group.com/catalog/>
8. Сандвиккороманд. Каталоги для загрузки. Сайт: <http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/downloads>
9. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Изд. “Политехника”, 2007. – 424 с.
10. Смазочно-охлаждающие технологические средства при механической обработке заготовок из различных материалов: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Ульяновск: УлПИ. – 1993. – 92 с.

11. Худобин Л. В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский - М.: Машиностроение, 1977. - 189 с. ил.
12. Леонов А. А. Повышение эффективности круглого наружного врезного шлифования путем поэтапной подачи смазочно-охлаждающих технологических средств: дис. кан. техн. наук / УлГТУ – Ульяновск. – 2001. – 256 с.
13. Ашихмин И. В. Исследование влияния твердых смазок на процессы трения и износа круга при абразивной разрезке нержавеющей сталей: Автореф. дис. кан. техн. наук / Новочеркас. политехн. ин-т – Новочеркасск. – 1981. – 21 с.
14. Ларшин В. П. Применение твердых технологических смазок при шлифовании вырубных штампов / В. П. Ларшин, А. А. Гречиха, А. В. Якимов // Вестник инженерной академии Украины. – 2001. – Вып. 3. - С.354 – 358.
15. Рутман П. А. Использование твердых смазок с легкоплавкими металлическими наполнителями при обработке металлов резанием / П. А. Рутман, В. С. Лобанцова // Смазочно – охлаждающие технологические средства в процессах абразивной обработки. Теоретические основы и техника применения: Сборник научных трудов. Ульяновск: УлПИ, 1988. – С.
16. Пат. 2238842 РФ, МПК 7 B24B55/02. Устройство для подачи смазки на шлифовальный круг / Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин, О.Г. Крупенников (РФ). – N 2003118087/02; Заявл. 03.06.2003; Опубл. 27.10.2004.
17. Маталин А. А. Технология машиностроения. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1985. – 496 с.
18. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение. – 1974. – 280 с.
19. Сипайлов В. А. Основы теории тепловых явлений при шлифовании металлов. Автореф. Дисс. ... докт. Техн. наук. – Томск. – 1971.
20. Сипайлов В. А. Основы теории тепловых явлений при шлифовании металлов. Автореф. Дисс. ... докт. Техн. наук. – Томск. – 1971.

21. Якимов А. В. и др. Теплофизика механической обработки: Учебное пособие / Якимов А.В., Слободняк П.Т., Усов А.В. К. – Одесса: Лыбидь. – 1991. – 240 с.
22. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 279 с.
23. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхности инструмента и деталей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 191 с.
24. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1979. – 248 с.
25. Правиков Ю. М. Повышение эффективности операций шлифования путем снижения засаливания рабочей поверхности шлифовального круга (на примере шлифования заготовок из алюминиевых сплавов): Дис....канд. техн. наук: 05.02.08 / Ульян. политехн. ин- т. – Ульяновск. – 1982. – 244 с.
26. Белов М. А. Повышение качества шлифованных деталей из коррозионно-стойких сталей путем рационального применения технологических жидкостей: Дис. канд. техн. наук. – Ульяновск, 1986. – 366 с.
27. Киселев Е. С. Исследование возможности повышения эффективности круглого наружного скоростного шлифования путем рационального использования смазочно-охлаждающих жидкостей: Дис. канд. техн. наук. – Ульяновск. – 1977. – 292 с.
28. Пат. 96117774 РФ, МПК 6 А, С10М141/04. Твердая смазка для абразивной обработки металлов / М.А. Булатов, В.И. Кононенко, В.Г. Лундина и др. (РФ). - N 96117774/04; Заявл. 04.09.1996; Оpubл. 20.11.1998.
29. Пат. 96120057 РФ, МПК 6 А1, С10М125/04, С10М169/04. Твердая смазка для абразивной обработки сталей и твердых сплавов (ее варианты) и антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов / С.В. Стариков, В.Я. Прушак, П.Н. Богданович (РФ). – N 96120057/04; Заявл. 03.10.1996; Оpubл. 27.06.1997.

30. Пат. 94039509 РФ, МПК 6 А1, С10М169/04. Твердая технологическая смазка для механической обработки металлов / В.В. Симашко, И.Н. Федоренко, И.В. Лендьел и др. (РФ). – N 94039509/04; Заявл. 20.10.1994; Оpubл. 10.08.1996.
31. Пат. 2118651 РФ, МПК6 С1, С10М125/04, С10М169/04. Антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов и твердые смазки, содержащие ее (варианты) / С.В. Стариков (RU), В.Я. Прушак (BY), П. Н. Богданович (BY). – N 96120057/04; Заявл. 08.10.1996; Оpubл. 10.09.1998.
32. Пат. 2114903 РФ, МПК6 С1, С10М141/04. Твердая смазка для абразивной обработки металлов / М.А. Булатов, В.И. Кононенко, В.Г. Лундина и др. (РФ). – N 96117774/04; Заявл. 04.09.1996; Оpubл. 10.07.1998.
33. Пат. 2005134068 РФ, МПК 6 А, С10М141/00. Твердая смазка для абразивной обработки материалов / В. И. Кононенко (RU), В. Д. Алехина (RU), Ю. А. Байдалин (RU) – N 2005134068/04; Заявл. 03.11.2005; Оpubл. 10.05.2007.
34. Дисульфид молибдена – эффективный антифрикционный компонент смазочных материалов. Сайт: <http://efele.ru/press/6.html>
35. Gleiter H. - Nanocrystalline materials // Progr. Mater.Sci. – 1989. – V.33, №4. – P. 223-315.
36. Nazarov A.A.Nanostructured Materials // Nanoscience, Engineering and Technology Handbook / Eds. Lyshevski S., Brenner D., Iafrate J. Goddard W. Boca Raton: CRC Press. 2002. P. 22-1-22-41.
37. Мулюков Р.Р. Развитие принципов получения и исследование объемных наноструктурных материалов в ИПСМ РАН // Российские нанотехнологии. 2007. – Т. 2. – № 7-8. – С. 38 – 53.
38. Перспективы нанотехнологии: наноавтохимия – Сервис – ресурсосбережение. Интернет сайт: <http://www.oils-autochemistry.ru/resurs-saving/229-perspektivy-nanotekhnologii.html>. - МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2007 г.

39. Ильин А. П. Влияние суспензии "моторное масло + смесь нанопорошков меди и никеля" на трибологические свойства пары трения "углеродистая сталь - низколегированная сталь" / А. П. Ильин, О. Б. Назаренко, С. В. Рихерт // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 3. – С. 77-79.
40. Яхьяев Н. Я. Новая смазочная композиция для модификации поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля / Н. Я. Яхьяев, Ж. Б. Бегов, Ш. Д. Батырмурзаев // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – 2009. – Вып. 1. – С. 251 – 255.
41. Меджибовский А. С. Наноприсадки – один из путей повышения качества смазочных масел // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2008. – Вып. 4. – С. 16 – 18.
42. Перекрестов А. П. Механизм действия противоизносной присадки на магниевой основе. // Вестник АГТУ. Сер. Механика. – 2008. – Вып. 2. – С.46 - 50.
50. Мельников В. Г. Исследование триботехнических свойств пластичных смазочных материалов, наполненных порошками твердых смазок. // Современные наукоемкие технологии. – 2007. – Вып. 4. – С. 62 – 67.
43. Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели. // Успехи физических наук. – 2000. – Вып. 6. – С. 584 – 618.
44. НПО «Нанотех». История открытия. Сайт: [http://www.diamond-auto.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=26&Itemid=25](http://www.diamond-auto.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=25)
45. Новиков, И. И. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. – М.: Металлургия. – 1981. – С. 133 – 140.
46. Грабовский, М. В. Структурная сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия. – 1975. – С. 249 – 257.
47. Полянчикова, М.Ю. Нанотехнологии в машиностроении: учебник / М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков, А. Г. Схиртладзе, А. Н. Воронцова, ВолгГТУ. – Волгоград. – 2013. – 620с.
48. Микрокерамические присадки INDIGO (WAGNER) Micro-CeramicOil Сайт: [www.indigo-auto.ru/products/micro-ceramic-oil](http://www.indigo-auto.ru/products/micro-ceramic-oil)

49. Каныгина О.Н. Особенности формирования фазовых составов в композитных керамических материалах на основе монтмориллонит содержащей глины. / О.Н.Каныгина, И.Н. Анисина. Сайт: [conference.osu.ru/assets/files/conf\\_reports/conf10/732.doc](http://conference.osu.ru/assets/files/conf_reports/conf10/732.doc)
50. А.А. Симакина. Исследование лечебной голубой глины и лекарственных порошков на ее основе. / А.А. Симакина, П.Г. Мизина, А.В. Волков. Сайт: [www.rusvrach.ru/articles/farmaciya/.../farmaciya\\_01\\_2012\\_Simakina.pdf](http://www.rusvrach.ru/articles/farmaciya/.../farmaciya_01_2012_Simakina.pdf)
51. Кантор Ч. Биофизическая химия: В 3-х т. Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - Т. 2 - 496 с., ил.
- 52 - 48. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 279 с.
53. Хусаинов А. Ш. Повышение производительности бездефектного шлифования заготовок клиновидных изделий. Дисс. ... докт. Техн. наук. – Ульяновск. – 2006.
54. Даниленко Б. Д. Исследования физико-механических свойств быстрорежущих сталей / Вестник машиностроения. – 2006. –N 5. – С. 26-31.
55. Справочник. Теплопроводность и свойства твердых материалов. Сайт: [http://thermalinfo.ru/publ/tverdye\\_veshhestva/raznye/teploprovodnost\\_i\\_svoystva\\_razlichnykh\\_tverdykh\\_materialov/20-1-0-6](http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/raznye/teploprovodnost_i_svoystva_razlichnykh_tverdykh_materialov/20-1-0-6)
56. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. Часть II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1999. – 474 с.
57. Валеев, Г.Х. Регрессионное моделирование при обработке данных. – Казань: ФЭН, 2001. – 296 с.
58. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов: методические указания. – М.: Изд. стандартов, 1978. – 64 с.
59. Худобин, Л.В. Курсовые и дипломные проекты с развитой научно-исследовательской частью: учебное пособие / Л.В. Худобин, В.Ф. Гурьянихин, В.Р. Берзин. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 84 с.

60. Блурцян Р.Ш., Блурцян Д.Р., Блурцян И.Р. Исследование технологических остаточных напряжений в поверхностных слоях крестовин при бесцентровом шлифовании Сайт: [www.mbsd.ru/pub/2011-3-8.pdf](http://www.mbsd.ru/pub/2011-3-8.pdf)
61. Малышев, В. И. Технология изготовления режущего инструмента: учеб. пособие / В.И. Малышев. – 2-е изд., стер. – Тольяти: Изд-во ТГУ, 2014. – 368 с. : пер.
62. Экономическая эффективность новой техники и технологии в машиностроении / Г.М. Великанов., В.А. Березин, Э.Г. Васильева и др. / Под общ.ред. Г.М. Великанова. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-е. – 1981. – 256 с.
63. Кремнев Г. П. Новые составы твердых смазок для лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов // Вестник инженерной академии Украины. – 2001. – Вып. 3. – С.351 – 354
64. Кигель И. К. Карандаш твердой смазки. / И. К. Кигель, В. А. Шарков // Машиностроитель. – 1984. - №2. – С. 24.
65. Степанов Ю. Н. Влияние импрегнирования шлифовальных кругов на качество поверхности при ручном шлифовании профиля лопаток / Ю. Н. Степанов, Н. К. Ходырев, В. В. Полянин // Совершенствование процессов абразивно – алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении: Межвуз. сборник науч. трудов. – Пермь: ППИ, 1983. – С. 168 – 170.
66. Structural lubricity: Role of dimension and symmetry/Müser M. H.//Europhys. Lett. – 2004. – 66, № 1. – С. 97 – 103. – Англ.
67. Пат. 2118651 РФ, МПК6, С10М125/04, С10М169/04, С10М169/04, С10М125:04, С10М159:08, С10М105:24, С10N40:20. Антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов и твердые смазки, содержащие ее. / С. В. Стариков (RU), В. Я. Прушак (BY), П. Н. Богданович (BY). – N 96120057/04; Заявл. 08.10.1996; Оpubл. 10.09.1998.
68. Бабошкин А.Ф. Кривая опорной поверхности для абразивных инструментов / Инструмент и технологии – СПб. – 2003. – № 11-12. – С. 148-153.

69. Бабошкин А.Ф. Моделирование рабочей поверхности абразивных лент набором тел геометрически правильной формы // Прогрессивные технологии в машиностроении Межвуз. сб. науч. трудов. – Волгоград: РПК “Политехник”, 2002. – Вып. 5. – С. 15-18.
70. Бабошкин А.Ф. Сравнительные характеристики различных моделей абразивных зерен // Прогрессивные технологии, машины и оборудование в машиностроении “Балттехмаш-2002”. Сб. тр. 3-ей междунар. н-т. конф. – Калининград: КГТУ, 2002. – С. 12-14.
71. Бабошкин А.Ф. Шероховатость рабочей поверхности абразивных лент / Инструмент и технологии – СПб. – 2003. – № 11-12. – С. 140-148.
72. Крагельский И.В. Узлы трения деталей машин: Справочник. – М.: Машиностроение. – 1984. – 280 с.
73. Кремень З.И. Виды шлифования и выбор характеристик абразивных кругов. СПб.: Изд. “Инструмент и технологии”, 2002. – 54 с.
74. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.
75. Оробинский В.М. Абразивные методы обработки и их оптимизация. М.: Машиностроение, 2000. – 314 с.
76. Пат. 2010141357 РФ, МПК6С10М107/00, В82В1/00. Смазочное средство, способ его изготовления и его применение, а также способ оптимизации трибологических свойств и противозадирного действия при его использовании в высокотемпературных пластичных смазках. / Т. Рюле(de), М. Кениг (de), Т.Россруккер(de), Д.Пацдциор (de), Г.Херинг(de), Д.Ларем (de) – N 2010141357/04; Заявл. 08.10.2010; Опубл. 20.04.2012.
77. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ. – 2007. – 298 с.
78. Правиков Ю. М. Повышение эффективности операций шлифования путем снижения засаливания рабочей поверхности шлифовального круга (на

примере шлифования заготовок из алюминиевых сплавов): Автореф. Дис. канд. техн. наук. – Саратов, 1983. – 16 с.

79. ГОСТ Р ИСО 16063-11-2009

80. Заточной станок для спиральных сверл«GS-1». Сайт: <http://nabor-sverla.uralkomplect.ru/zatochnoy-standok-dlya-sverl.php>

81. Заточной станок «UTG-220». Сайт: <http://www.trio-d.ru/catalog?func=detail&id=48>

82. Ткачев А.Г., Мищенко СВ., Коновалов В.И. Российские нанотехнологии. - 2007. -Т 2. - № 7-8. -С. 100-108.

83.Урывский Ф. П. Выбор оптимального состава смазочно-охлаждающих элементов в композиционных кругах / Ф. П. Урывский, В. А. Михайлов, В.Н. Трусов // Оптимизация процессов резания жаро-и особопрочных материалов: межвуз. науч. сб. –УФА: Уфим. авиац. ин-т. – 1981. –Вып. 6. –С. 45 –48.

84.Худобин Л. В. Теплосиловая напряженность плоского торцового шлифования композиционными кругами различных характеристик / Л. В. Худобин, С. М. Михайлин, А. Н. Унянин // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: материалы международной научно-техн. конф. Т. 1. –Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2008. –С. 69 –74.

85.Экономика машиностроительного производства: учебное пособие / В. А. Зайцев; под ред. О. Н. Герасиной. –М.: МГИУ, 2007. –127 с.

86.Якимов А. В. Технология машиностроения / А. В. Якимов, В. Н. Царюк, А. А. Якимов и др.; под общ.ред. А. В. Якимова. –Одесса: Астропринт, 2001. –608 с.

87.Киселев, Е.С. Использование ультразвука при обработке заготовок шлифованием и алмазным выглаживанием / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, З.В. Степчева // Упрочняющие технологии и покрытия, 2007. -№8. –с.43-53.

88.Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М.

Булыжев идр. / Под общ.ред. Л.В. Худобина. –М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

89.Степанов А. В. Повышение эффективности плоского шлифования путем применения карандашей твердой смазки с наполнителями из наноматериалов / Н. И. Веткасов, А. В. Степанов, В. В. Сапунов // МОЛОДЕЖЬ И НАУКА XXI ВЕКА: Материалы III-й Международной научно-практической конференции 23-26 ноября 2010 г. / под общ.ред. А. В. Дозорова. - Ульяновск: ГСХА, 2010. - с. 128 — 131.

90.Степанов А. В. Карандаши твердой смазки / Н. И. Веткасов, А. В. Степанов // Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечения компьютерных технологий в машиностроении. Материалы международной молодежной научной школы семинара. 12 – 15 мая 2011 г. – Ульяновск :УлГТУ, 2011. – С. 207 - 210

91.Степанов А. В. Карандаши твердой смазки с наполнителями из наноматериалов / Е. А. Голубев, А. В. Степанов, В. В. Сапунов //Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа (УлГТУ, 12 – 14 мая 2011 г.): Сборник аннотаций проектов. – Ульяновск :УлГТУ. – 2011. – С. 121 - 122

92.Степанов А. В. Карандаши твердой смазки / Н. И. Веткасов, А. В. Степанов //«МОЛОДАЯ НАУКА XXI ВЕКА»: сборник научных работ международной студенческой научной конференции / под общ. ред. С. В. Ковалевского, д-ра техн. наук., проф. – Краматорск : ДГМА. – 2011. – С. 207 - 210.

93.Степанов А. В. Повышение качества поверхностного слоя шлифованных заготовок путем применения карандашей твердой смазки с наполнителями из ультрадисперсных природных и наноматериалов./ Н. И. Веткасов, А. В. Степанов, В. В. Сапунов/ Научоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях. – Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева. – 2012. – Ч.II.- С. 59 - 62

94. Степанов А. В. Моделирование тепловых полей в заготовке при плоском шлифовании периферией круга с применением карандашей твердой смазки. / Н. И. Веткасов, А. В. Степанов, В. В. Сапунов // Современные наукоемкие технологии: приоритеты развития и подготовки кадров: Сборник статей международной научно-практической конференции. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014 – 328 С. 75 - 79
95. Степанов А. В. Повышение качества поверхностного слоя шлифованных заготовок путем применения многослойных смазочных покрытий. / А. В. Степанов, Н. И. Веткасов // Техника и технологии машиностроения: Материалы IV международной студенческой научно-практической конференции – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2015. – С. 226 - 229
96. Степанов А. В. Снижение теплосиловой напряженности в зоне шлифования путем применения многослойных смазочных покрытий / XLI Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 4 томах. Москва 7-9 апреля 2015 года. М. – 2015. – Т. 1. – С. 63 - 64
97. Степанов А. В. Расчет шероховатости поверхностей, шлифованных с применением твердых смазочных материалов / А. В. Степанов, Н. И. Веткасов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 3-1 (33-1). – С. 36-41.
98. Степанов А. В. Моделирование теплонапряженности плоского шлифования с применением твердого смазочного материала с наполнителями из наноматериалов и высокодисперсных материалов. / А. В. Степанов, Н. И. Веткасов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 5 (184). – С. 85-90.
99. Патент № 2531587, РФ. МПК С10М125/00. Твердый смазочный материал для абразивной обработки / А. В. Степанов, Н. И. Веткасов, Е. А. Жегалов. – Оpubл. 20.10.2014. Бюл. №9.

100.Свидетельство №2015616818 РФ о государственной регистрации программы на ЭВМ. Расчет шероховатости. /А.В. Степанов, Н.И. Веткасов. – Оpubл. 20.07.2015.

101. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Изд. “Политехника”, 2007. – 424 с.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

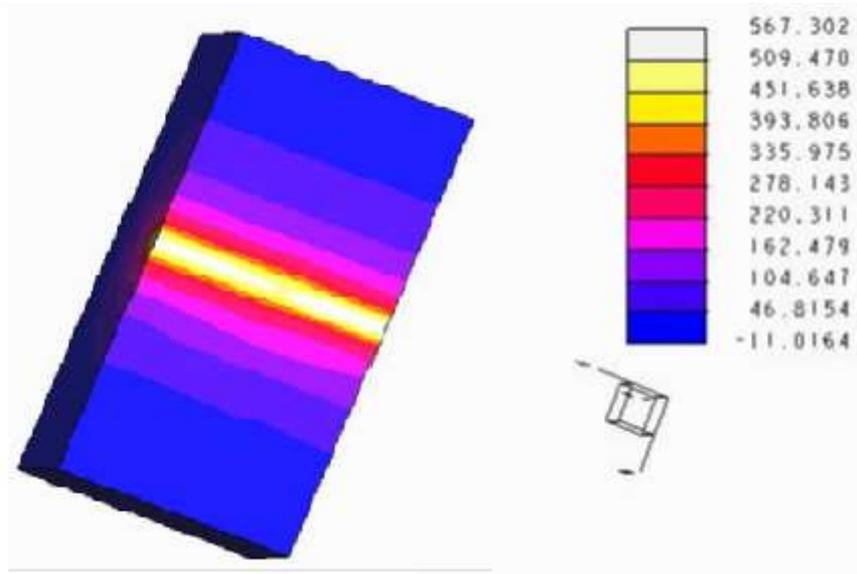
**Исходные данные при моделировании температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS**

Номер опыта	$S_{вр}$ , мм/дв. ход	$V_{сш}$ м/мин	<i>Состав ТСМ</i>	$L_{к}$ , м	$P_z$ , Н	$Q$ , Вт/м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
1	0,01	5	Г2	0,00158	36,8	40674796
2	0,03	5	Г2	0,00274	45,3	28915186
3	0,01	15	Г2	0,00158	47	52019467
4	0,03	15	Г2	0,00274	51,5	32908997
5	0,01	5	Г5	0,00158	43,5	481145677
6	0,03	5	Г5	0,00274	51,3	32749244
7	0,01	15	Г5	0,00158	56,6	625340040
8	0,03	15	Г5	0,00274	67,5	43133151
9	0,01	5	Д1	0,00158	42,2	46706841
10	0,03	5	Д1	0,00274	49,6	31694878
11	0,01	15	Д1	0,00158	52,2	57774812
12	0,03	15	Д1	0,00274	61,6	39362994
13	0,01	5	Д4	0,00158	38,5	42611691
14	0,03	5	Д4	0,00274	46,5	29713948
15	0,01	15	Д4	0,00158	51,3	56723355
16	0,03	15	Д4	0,00274	62	39618598
17	0,01	5	М1	0,00158	49,8	55063159
18	0,03	5	М1	0,00274	52,5	33548006
19	0,01	15	М1	0,00158	55,5	61427243
20	0,03	15	М1	0,00274	61,5	39299093
21	0,01	5	Алм	0,00158	49,8	55063159
22	0,03	5	Алм	0,00274	53,8	34346768
23	0,01	15	Алм	0,00158	56,8	62810740
24	0,03	15	Алм	0,00274	69,3	44251418
25	0,01	5	Г2А5	0,00158	46,8	51742768
26	0,03	5	Г2А5	0,00274	57,3	36583302
27	0,01	15	Г2А5	0,00158	58,8	65024334
28	0,03	15	Г2А5	0,00274	62	39618598
29	0,01	5	Г2М5	0,00158	31,7	35101282
30	0,03	5	Г2М5	0,00274	32,8	20996031
31	0,01	15	Г2М5	0,00158	40,1	44456353
32	0,03	15	Г2М5	0,00274	44,5	28435929
33	0,01	5	Д1А5	0,00158	31,5	34864111
34	0,03	5	Д1А5	0,00274	32,3	21886080

## ПРОДОЛЖЕНИЕ Б

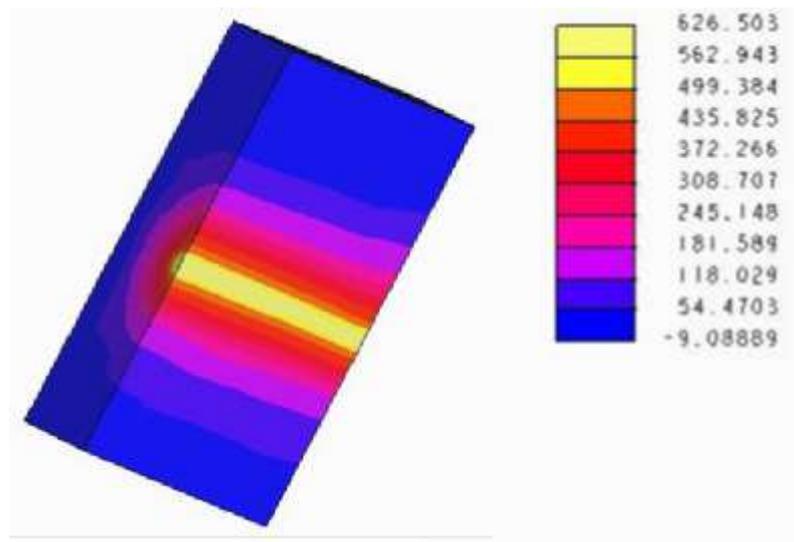
Результаты моделирования температурных полей заготовки,  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,01$  мм / дв. ход  
Состав ТCM: Г2



Результаты моделирования температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

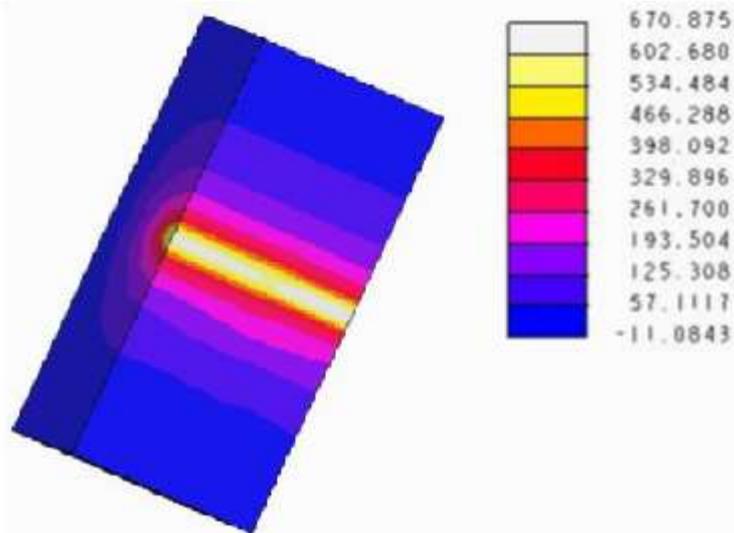
Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,03$  0,01 мм / дв. ход  
Состав ТCM: Г2



## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛ.Б

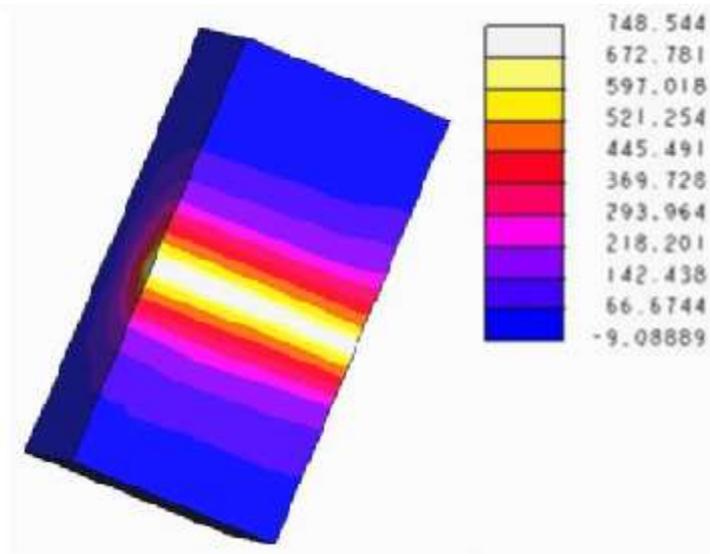
Результаты моделирования температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,01$  мм / дв. ход  
Состав ТСМ: М



Результаты моделирования температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

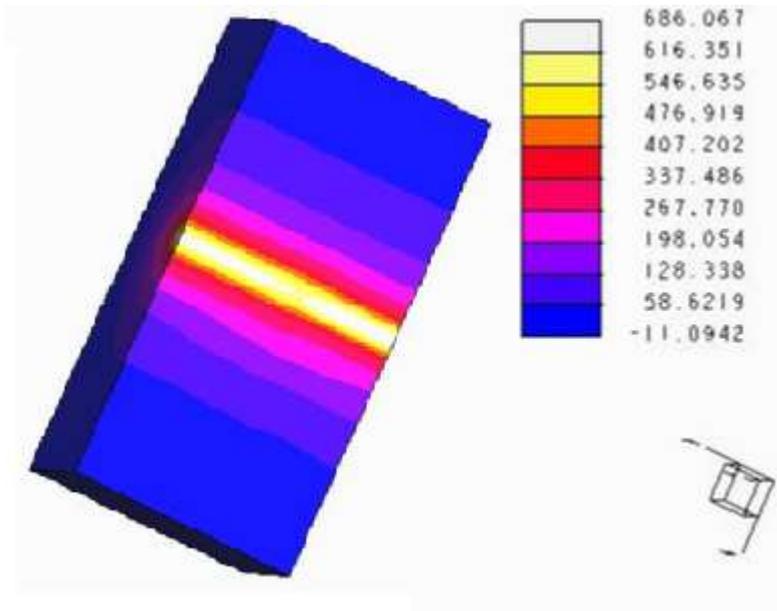
Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,03$  мм / дв. ход  
Состав ТСМ: М



## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛ.Б

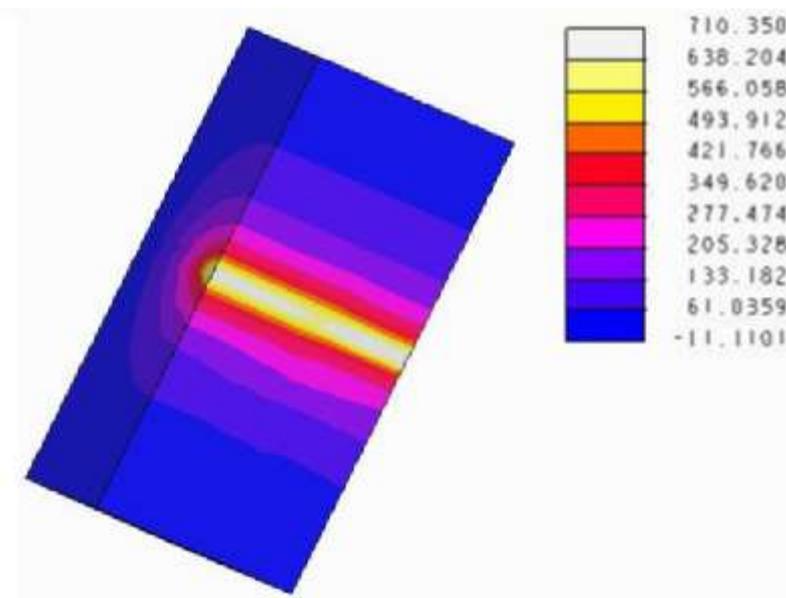
Результаты моделирования температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,01$  мм / дв. ход  
Состав ТСМ: А



Результаты моделирования температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

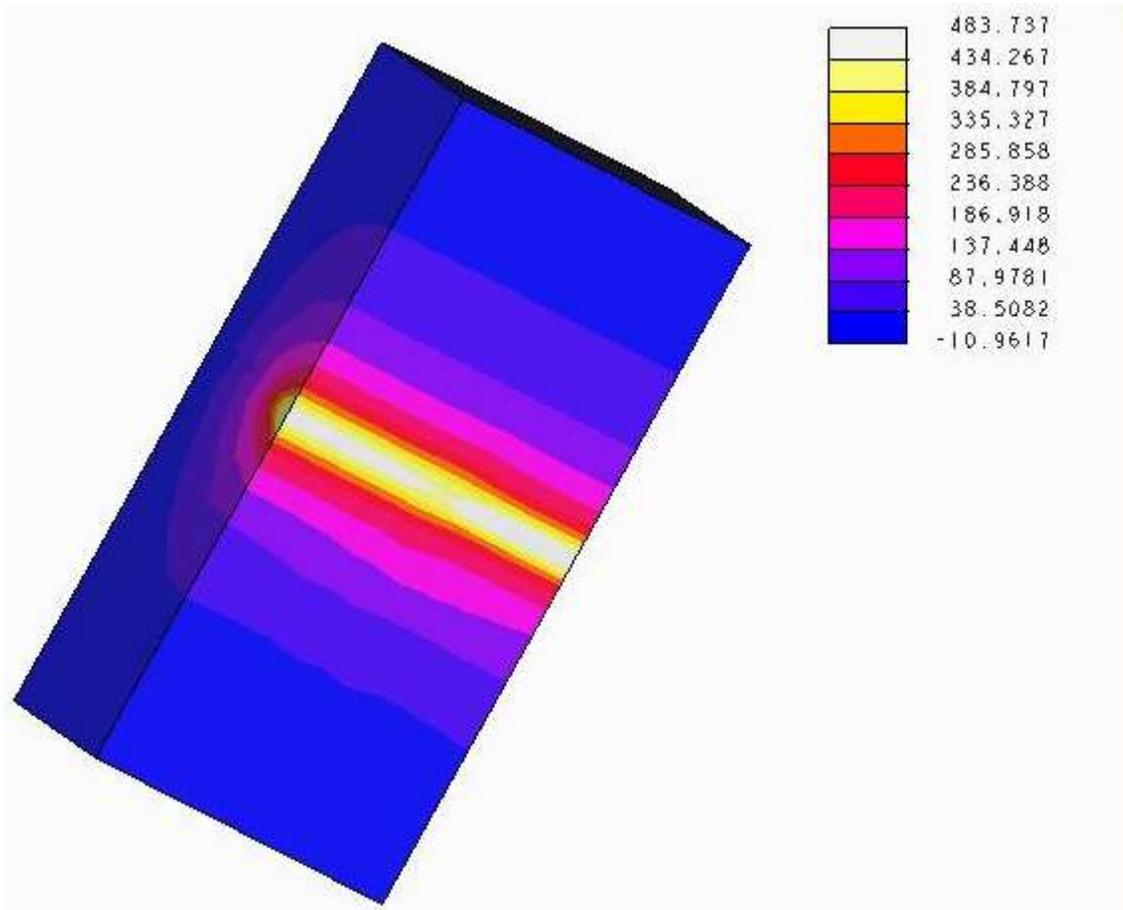
Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,01$  мм / дв. ход  
Состав ТСМ: Г2А5



## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛ.Б

Результаты моделирования температурных полей заготовки  
шлифованной кругом КЗ в программном пакете Creo 2.0 с решателем  
ANSYS

Режимы обработки:  $V_{cm} = 15$  м/мин,  $S_{ep} = 0,01$  мм / дв. ход  
Состав ТСМ: Г2М5



**ИСХОДНЫЙ КОД ПРОГРАММЫ КОНВЕРТОРА ДАННЫХ  
НАПИСАННЫЙ НА C++**

**Файл: Unit1.cpp**

```
//-----
#include <vcl.h>
#include <string>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include <vector>
#include <set>
#include <list>
#pragma hdrstop
#include <iomanip>

using namespace std;
#include "Unit1.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;
//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
    FileOpenDialog1->Execute();
    Edit1->Text=FileOpenDialog1->FileName;
    Edit2->Text=FileOpenDialog1->FileName+"(Канал 7).bin.bat";
    Edit3->Text=FileOpenDialog1->FileName+"(Канал 6).bin.bat";
}
//-----
void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    Panel3->Caption="Пожалуйста ждите. Идет процесс конвертирования";
    AnsiStringi_file;
```

```

AnsiString o_file1;
AnsiString o_file2;
AnsiString const7;
AnsiString const6;

```

```

i_file=Edit1->Text;
o_file1=Edit2->Text;
o_file2=Edit3->Text;
const7=Edit4->Text;
const6=Edit5->Text;

```

```

char* a=i_file.c_str();
char* b=o_file1.c_str();
char* c=o_file2.c_str();

```

```

ifstream input_file(a);
ofstream out_file1(b);
ofstream out_file2(c);

```

```

out_file1<<"Усиление: Min   dlt: 0.00   Поток (Hz): 50000   Питание
(mV): 1990 Right 30.11.11"<< '\n';
out_file1<<"12:41:33"<< '\n';
out_file1<<"*****"<< '\n';

```

```

out_file2<<"Усиление: Min   dlt: 0.00   Поток (Hz): 50000   Питание
(mV): 1990 Right 30.11.11"<< '\n';
out_file2<<"12:41:33"<< '\n';
out_file2<<"*****"<< '\n';

```

```

std::string line;
std::string out[10];

```

```

while(!input_file.eof())
{
    getline(input_file, line);
    char *s = new char[line.size() + 1];
    strcpy(s, line.c_str());
    char *p = strtok(s, ",");
    inti=1;
    while (p !=NULL)
    {
        out[i]=p;

```

```
p = strtok(NULL, ";");
```

```
    i++;
}
```

```
    stringbuf = "";
    for (int j = 0; j < out[2].length(); j++) {
        if (out[2].substr(j, 1) == ",") {
            buf.append(".");
            continue;
        }
        buf.append(out[2].substr(j, 1));
    }
```

```
    string buf1 = "";
    for (int k = 0; k < out[3].length(); k++) {
        if (out[3].substr(k, 1) == ",") {
            buf1.append(".");
            continue;
        }
        buf1.append(out[3].substr(k, 1));
    }
```

```
out[2] = buf;
```

```
out[3] = buf1;
```

```
long double out7=_atold(out[2].c_str())/_atold(const7.c_str());
std::ostringstream;
std::ostringstream oss1;
oss<<fixed <<setprecision(15)<<out7;
out[2]=oss.str();
long double out6=_atold(out[3].c_str())/_atold(const6.c_str());
oss1 <<fixed <<setprecision(15)<<out6;
out[3]=oss1.str();
```

```
string buf3 = "";
for (int l = 0; l < out[2].length(); l++) {
    if (out[2].substr(l, 1) == ".") {
        buf3.append(",");
        continue;
    }
    buf3.append(out[2].substr(l, 1));
}
```

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛ. В**

```
string buf4 = "";
for (int m = 0; m < out[3].length(); m++) {
    if (out[3].substr(m, 1) == ".") {
        buf4.append(",");
        continue;
    }
    buf4.append(out[3].substr(m, 1));
}
out[2] = buf3;
out[3] = buf4;
    out_file1<<out[2]<< "\n";
    out_file2<<out[3]<< "\n";
}
```

```
Panel3->Caption="Конвертирование завершено";
```

```
}
```

```
//-----
```

Файл: Unit1.h

```

//-----
#ifndef Unit1H
#define Unit1H
//-----
#include <Classes.hpp>
#include <Controls.hpp>
#include <StdCtrls.hpp>
#include <Forms.hpp>
#include <Dialogs.hpp>
#include <ExtCtrls.hpp>
//-----
class TForm1 : public TForm
{
__published:      // IDE-managed Components
    TPanel *Panel1;
    TEdit *Edit1;
    TFileOpenDialog *FileOpenDialog1;
    TButton *Button1;
    TPanel *Panel2;
    TEdit *Edit2;
    TEdit *Edit3;
    TButton *Button2;
    TPanel *Panel3;
    TPanel *Panel4;
    TPanel *Panel5;
    TPanel *Panel6;
    TEdit *Edit4;
    TEdit *Edit5;
    void __fastcall Button1Click(TObject *Sender);
    void __fastcall Button2Click(TObject *Sender);
private:         // User declarations
public:          // User declarations
    __fastcall TForm1(TComponent* Owner);
};
//-----
extern PACKAGE TForm1 *Form1;
//-----
#endif

```

Файл: Project1.cpp

```
//-----  
  
#include <vcl.h>  
#pragma hdrstop  
#include <tchar.h>  
//-----  
USEFORM("Unit1.cpp", Form1);  
//-----  
WINAPI _tWinMain(HINSTANCE, HINSTANCE, LPTSTR, int)  
{  
    try  
    {  
        Application->Initialize();  
        Application->MainFormOnTaskBar = true;  
        Application->CreateForm(__classid(TForm1), &Form1);  
        Application->Run();  
    }  
    catch (Exception &exception)  
    {  
        Application->ShowException(&exception);  
    }  
    catch (...)  
    {  
try  
        {  
            throw Exception("");  
        }  
        catch (Exception &exception)  
        {  
            Application->ShowException(&exception);  
        }  
    }  
    return 0;  
}  
//-----
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Регрессионные зависимости для расчета критериев технологической эффективности операции шлифования заготовок из стали Р6М5 с применением ТСМ

Состав ТСМ	Уравнение регрессии
Г2	$T_k = 144,62 S_{ep}^{0,038} V_{cm}^{0,094} Z^{-0,031} S^{0,346}$
Г2	$P_z = 173,84 S_{ep}^{0,133} V_{cm}^{0,224} Z^{0,915} S^{-0,517}$
Г2	$P_y = 32,14 S_{ep}^{0,156} V_{cm}^{0,324} Z^{-0,820} S^{0,902}$
Г2	$Ra = 1,206 \times 10^{11} S_{ep}^{0,194} V_{cm}^{0,215} Z^{1,203} S^{-8,639}$
Г2	$Rz = 1,48 \times 10^8 S_{ep}^{0,161} V_{cm}^{0,181} Z^{0,964} S^{-6,099}$
Г2	$Rmax = 1,34 \times 10^8 S_{ep}^{0,185} V_{cm}^{0,145} Z^{1,180} S^{-6,164}$
Г5	$T_k = 0,944 S_{ep}^{0,044} V_{cm}^{0,074} Z^{-0,341} S^{2,130}$
Г5	$P_z = 2,24 S_{ep}^{0,162} V_{cm}^{0,317} Z^{-7,393} S^{1,467}$
Г5	$P_y = 141,69 S_{ep}^{0,102} V_{cm}^{0,288} Z^{0,00013} S^{-0,230}$
Г5	$Ra = 8,53 \times 10^2 S_{ep}^{0,308} V_{cm}^{-0,015} Z^{0,016} S^{-1,822}$
Г5	$Rz = 9,44 \times 10 S_{ep}^{0,254} V_{cm}^{-0,148} Z^{0,124} S^{-0,863}$
Г5	$Rmax = 1,17 \times 10^5 S_{ep}^{0,196} V_{cm}^{-0,0065} Z^{0,156} S^{-2,796}$
Д1	$T_k = 35,31 S_{ep}^{0,101} V_{cm}^{0,198} Z^{0,060} S^{0,582}$
Д1	$P_z = 0,088 S_{ep}^{0,153} V_{cm}^{0,230} Z^{-0,903} S^{2,448}$
Д1	$P_y = 0,4 S_{ep}^{0,240} V_{cm}^{0,287} Z^{-0,859} S^{2,156}$
Д1	$Ra = 2,35 \times 10^5 S_{ep}^{0,226} V_{cm}^{0,431} Z^{0,141} S^{-3,754}$
Д1	$Rz = 2,31 \times 10^4 S_{ep}^{0,128} V_{cm}^{0,292} Z^{0,107} S^{-2,597}$
Д1	$Rmax = 7,42 \times 10^5 S_{ep}^{0,163} V_{cm}^{0,295} Z^{0,235} S^{-3,492}$
Д4	$T_k = 6,5 S_{ep}^{0,123} V_{cm}^{0,154} Z^{-0,083} S^{1,240}$
Д4	$P_z = 60,21 S_{ep}^{0,183} V_{cm}^{0,261} Z^{0,042} S^{-0,046}$
Д4	$P_y = 191,26 S_{ep}^{0,221} V_{cm}^{0,342} Z^{-0,082} S^{-0,163}$
Д4	$Ra = 2,31 \times 10^{-6} S_{ep}^{0,164} V_{cm}^{0,341} Z^{-0,869} S^{4,217}$
Д4	$Rz = 5,46 \times 10^{-4} S_{ep}^{0,174} V_{cm}^{-0,202} Z^{-0,524} S^{2,762}$
Д4	$Rmax = 1,64 \times 10^{-4} S_{ep}^{0,140} V_{cm}^{-0,178} Z^{-0,479} S^{3,059}$
М1	$T_k = 10,56 S_{ep}^{0,117} V_{cm}^{0,225} Z^{-0,0047} S^{1,047}$
М1	$P_z = 1927,77 S_{ep}^{0,143} V_{cm}^{0,263} Z^{0,343} S^{-1,201}$
М1	$P_y = 0,997 \times 10^5 S_{ep}^{0,131} V_{cm}^{0,271} Z^{0,299} S^{-2,132}$
М1	$Ra = 5,32 \times 10^4 S_{ep}^{0,101} V_{cm}^{0,291} Z^{-0,193} S^{-3,023}$
М1	$Rz = 1,37 \times 10^3 S_{ep}^{0,108} V_{cm}^{0,190} Z^{0,0064} S^{-1,759}$
М1	$Rmax = 4,18 \times 10^3 S_{ep}^{0,143} V_{cm}^{0,216} Z^{0,050} S^{-1,976}$
А	$T_k = 2,9 S_{ep}^{0,115} V_{cm}^{0,177} Z^{0,011} S^{1,354}$
А	$P_z = 0,358 \times 10^7 S_{ep}^{0,179} V_{cm}^{0,228} Z^{-0,501} S^{-2,237}$
А	$P_y = 129,72 S_{ep}^{0,057} V_{cm}^{0,115} Z^{0,115} S^{0,115}$
А	$Ra = 1,61 \times 10^{-2} S_{ep}^{0,189} V_{cm}^{0,047} Z^{0,258} S^{0,416}$
А	$Rz = 0,15 S_{ep}^{0,157} V_{cm}^{0,043} Z^{0,378} S^{-0,359}$
А	$Rmax = 0,624 S_{ep}^{0,160} V_{cm}^{0,035} Z^{0,444} S^{-0,0038}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Регрессионные зависимости для расчета критериев технологической эффективности операции шлифования заготовок из стали Р6М5 с применением ТСМ с наполнителями из наноматериалов

Шлифовальный Круг (табл. 3.2)	Состав ТСМ (табл. 2.1)	Уравнение регрессии
1	2	4
К3	Г2А5	$T_k = 631,94 S_{ep}^{0,079} V_{cm}^{0,103}$
К3	Г2А5	$P_z = 66,27 S_{ep}^{0,117} V_{cm}^{0,140}$
К3	Г2А5	$P_y = 62,90 S_{ep}^{0,115} V_{cm}^{0,265}$
К3	Г2А5	$Ra = 0,68 S_{ep}^{0,478} V_{cm}^{0,415}$
К3	Г2А5	$Rz = 2,74 S_{ep}^{0,273} V_{cm}^{0,231}$
К3	Г2А5	$Rmax = 2,28 S_{ep}^{0,201} V_{cm}^{0,333}$
К3	Г2М5	$T_k = 494,46 S_{ep}^{0,131} V_{cm}^{0,227}$
К3	Г2М5	$P_z = 35,15 S_{ep}^{0,063} V_{cm}^{0,105}$
К3	Г2М5	$P_y = 55,83 S_{ep}^{0,160} V_{cm}^{0,205}$
К3	Г2М5	$Ra = 0,11 S_{ep}^{0,135} V_{cm}^{0,610}$
К3	Г2М5	$Rz = 0,61 S_{ep}^{0,030} V_{cm}^{0,475}$
К3	Г2М5	$Rmax = 0,71 S_{ep}^{0,054} V_{cm}^{0,541}$
К3	Д1А5	$T_k = 815,09 S_{ep}^{0,248} V_{cm}^{0,237}$
К3	Д1А5	$P_z = 32,06 S_{ep}^{0,160} V_{cm}^{0,418}$
К3	Д1А5	$P_y = 90,94 S_{ep}^{0,156} V_{cm}^{0,191}$
К3	Д1А5	$Ra = 0,29 S_{ep}^{0,028} V_{cm}^{-0,290}$
К3	Д1А5	$Rz = 1,76 S_{ep}^{0,039} V_{cm}^{-0,157}$
К3	Д1А5	$Rmax = 1,93 S_{ep}^{0,074} V_{cm}^{-0,041}$
К3	Д1М5	$T_k = 490,55 S_{ep}^{0,100} V_{cm}^{0,215}$
К3	Д1М5	$P_z = 36,96 S_{ep}^{0,074} V_{cm}^{0,203}$
К3	Д1М5	$P_y = 67,18 S_{ep}^{0,178} V_{cm}^{0,256}$
К3	Д1М5	$Ra = 0,30 S_{ep}^{0,112} V_{cm}^{0,021}$
К3	Д1М5	$Rz = 2,45 S_{ep}^{0,132} V_{cm}^{-0,030}$
К3	Д1М5	$Rmax = 7,70 S_{ep}^{0,311} V_{cm}^{-0,077}$

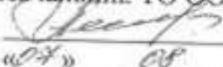
## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Регрессионные зависимости остаточных напряжений от скорости стола  $V_{ст}$  и врезной подачи  $S_{вр}$  для различных составов ТСМ при шлифовании кругом КЗ (табл. 3.2)

Состав материала ТСМ	Регрессионная зависимость
А	$\sigma_0 = 780,25 - 4,55 V_{cm} - 1075 S_{вр}$
Г2	$\sigma_0 = 611,74 - 5,65 V_{cm} + 225 S_{вр}$
Г5	$\sigma_0 = 707,25 + 1,05 V_{cm} - 825 S_{вр}$
М	$\sigma_0 = 861,99 - 8,19 V_{cm} - 2949,9 S_{вр}$
Д1	$\sigma_0 = 729,75 - 3,55 V_{cm} - 1275 S_{вр}$
Д4	$\sigma_0 = 741,75 - 3,25 V_{cm} - 625 S_{вр}$
Д1А5	$\sigma_0 = 945,75 - 11,35 V_{cm} - 3025 S_{вр}$
Д1М5	$\sigma_0 = 698,25 + 2,05 V_{cm} - 975 S_{вр}$

Утверждаю:

Начальник ТО ООО «ДИЗ»

 А.Е.Лазарев  
«07» «08» 2012 г.

**Акт**  
испытаний карандашей твёрдой смазки

С 20.07.2012г. по 07.08.2012 г. в цехе №71 проводились испытания образцов карандашей твёрдой смазки.

**Комиссия в составе:** инженер-технолог ТО Потанцев А.Н., мастер цеха №71 Муртазин А.Р контролировали ход проведения испытаний.

**Цель:** Рассмотрение вопроса целесообразности применения карандашей твёрдой смазки

Испытания карандашей проводились на заточных станках модели ЗВ642.  
Шлифовальные круги: 25А 25Н СМ2 7К13, 25А 8ПСМ1 9К5  
Обрабатываемый материал: Р6М5, Р6М5К5.

**Результаты испытаний:**

3 карандаш – Д1 (оранжевый)

1. Фреза двухсторонняя 2200-5040 ст. Р6М5 круг 25А 25Н СМ2 7К13  
затачивали задний угол <math>< 8^\circ</math> обрабатывается хорошо, держит профиль круга, хорошая чистота.
2. Фреза трёхсторонняя 2240-5032 ст. Р6М5К5 круг 25А 25Н СМ2 7К13  
затачивали задний угол <math>< 6^\circ</math> обрабатывается хорошо, держит профиль круга, хорошая чистота;  
затачивали передний угол <math>< 15^\circ</math> круг 25А 8ПСМ1 9К5 обрабатывается хорошо, держит профиль круга, хорошая чистота.

**Выводы:**

Анализ результатов испытаний показал, что предоставленный карандаши твёрдой смазки пригоден для предварительной и окончательной шлифовки и заточки изделий. Карандаш предотвращает появление прижогов, увеличивает стойкость круга, улучшает чистоту обработки.

Инженер-технолог ТО



Потанцев А.Н.

Мастер цеха №71

*Муртазин*

Муртазин А.Р.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2014616624****Конвертер данных**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Степанов Аполлон Владимирович (RU),  
Веткасов Николай Иванович (RU)*

Заявка № **2014614080**Дата поступления **06 мая 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **30 июня 2014 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015616818

Расчет шероховатости

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Степанов Аполлон Владимирович (RU),  
Веткасов Николай Иванович (RU)*

Заявка № 2015613817

Дата поступления 07 мая 2015 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 24 июня 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014616620

Расчет шероховатости

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Степанов Аполлон Владимирович (RU),  
Веткасов Николай Иванович (RU)*

Заявка № 2014614073

Дата поступления 06 мая 2014 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 30 июня 2014 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

Методика определения коэффициента  $K_{TSM}$ 

1. Проведение экспериментальных исследований влияния расхода TSM  $Q$  и времени шлифования  $\tau$  на амплитуду динамических колебаний  $A_d$  по следующей матрице планирования экспериментов:

Матрица планирования эксперимента  $2^4$  при шлифовании с применением TSM

Условия планирования	Факторы				
	Расход $Q, г$		Время шлифования $\tau$		
	г		мин		
	$X_1$		$X_2$		
Верхний уровень	1		1		
Основной уровень	2		2,5		
Нижний уровень	3		4		
Номер опыта	Действительные значения			Кодированные значения	
	Расход $Q, г$	Время шлифования $\tau, мин$		$X_0$	$X_1$
1	0,01	1		+	-
2	0,01	4		+	+
3	0,03	1		-	-
4	0,03	4		-	+

2. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных, получение степенной регрессионной зависимости в виде:

$$A_d(\tau, Q) = K \cdot Q^\varepsilon \cdot \tau^\varphi$$

3. Определение амплитуды статических колебаний ШК  $A_{ст}$ .

4. По методике [99] определение жесткости система  $j_c$  и жесткости резания  $j_p$ .

5. Определение коэффициента демпфирования  $K_d$ .

6. Определение коэффициента влияния состава TSM на амплитуду динамических колебаний по формуле:

$$K_{TSM} = \frac{K}{A_{ст} \cdot K_d \cdot \frac{j_c}{j_c + j_p}}$$

«Утверждаю»  
Заместитель директора по  
производству ООО «Автопромэко»  
Гурьянов В.И.  
«29» мая 2017 г.

«Утверждаю»  
Первый проректор – проректор  
по научной работе УлГТУ  
Ярушкина Н.Г.  
2017 г.

**Акт**

опытно-промышленных испытаний твердых смазочных материалов  
на операции плоского шлифования периферией круга матриц и пуансонов  
из инструментальной стали X12M, HRC 55...60

Настоящий акт составлен в том, что в период с 23 по 28 октября 2016 г. в механическом цехе ООО «Автопромэко» представителями ООО «Автопромэко» и Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ) проведены опытно-промышленные испытания ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции шлифования матриц и пуансонов из инструментальной стали X12M, HRC 55...60.

Цель испытаний: выявить технологическую эффективность ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции шлифования матриц и пуансонов из инструментальной стали X12M, HRC 55...60, в условиях действующего производства ООО «Автопромэко».

Производственные испытания были проведены при плоском шлифовании периферией круга, на рабочую поверхность которого наносили контактным методом испытываемые составы ТСМ (Г2, Г2М5, Д1, Д1М5). За базу для сравнения были приняты показатели шлифования без применения СОЖ.

Для контроля параметров процесса шлифования применяли следующие измерительные средства: штангенциркуль ШЦ 1-125 – 0,1 (ГОСТ 166); профилометр мод. 170622 завода «Калибр», тип II, степень точности 2 по ГОСТ 19300.

Условия испытаний приведены в табл. 1.

#### 1. Условия испытаний

Обрабатываемая заготовка	Матрицы и пуансоны из инструментальной стали X12M, HRC 55...60
Станок	Плоскошлифовальный мод. 3Д711ВФ11

Шлифовальный круг	1 – 250×40×76 25AF40L6V50, ГОСТ P52781-2007.
Условия шлифования	Продольная подача $S_{пр} = (17 - 19)$ м/мин, врезная подача $S_{вр} = (0,015 - 0,020)$ мм/дв.х, поперечная подача $S_0 = 1,0$ мм/х., снимаемый припуск $t = 0,4$ мм. После съема основной части припуска осуществляли выхаживание – 3 прохода без врезной подачи. Ширина и длина обрабатываемой поверхности соответственно 40 и 100 мм. Средние значения перебега и недобега обрабатываемой заготовки – незначимо малые величины. Окружная (рабочая) скорость круга $V_k = 28$ м/с. Обработку выполняли всухую
Условия правки	Шлифовальный круг правили методом обтачивания, используя в качестве правящего инструмента алмазный карандаш 3908 – 0083 С2 (ГОСТ 607) по режиму: 3 прохода с $S_{пр} = 0,02$ мм/ход; 3 прохода без подачи. Продольная подача алмазного карандаша $S_{пр} = 0,2 \pm 0,05$ м/мин
Условия нанесения ТСМ на рабочую поверхность круга	На рабочую поверхность круга ТСМ наносили вручную контактным методом через каждые 30 дв.х. Время нанесения ТСМ на рабочую поверхность круга составляло 30 с.

Результаты опытно-промышленных испытаний приведены в табл. 2.

2. Результаты опытно-промышленных испытаний ТСМ на операции шлифования матриц и пуансонов

ТСМ	Показатели работоспособности кругов	
	Стойкость ШК, мин.	Среднее арифметическое отклонение профиля $R_a$ , при шлифовании с бесприжоговой подачей, мкм <sup>*)</sup>
Без применения СОЖ (шлифование «всухую»)	25	0,9
Состав Г2	75	0,68
Состав Г2М5	72	0,78
Состав Д1	64	0,64
Состав Д1М5	68	0,74

<sup>\*)</sup> – заданное значение  $R_a$  по чертежу – 0,9 мкм

**ОКОНЧАНИЕ ПРИЛ. К**

Опытно-промышленные испытания ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции плоского шлифования периферией круга матриц и пуансонов по номенклатуре ООО «Автопромэко» показали, что их применение по сравнению с технологией шлифования «всухую» ШК такого же типоразмера и характеристики позволяет увеличить стойкость кругов до 3 раз при снижении шероховатости шлифованной поверхности, заданной чертежом, до 25%. Лучшие результаты из всех испытанных ТСМ показал состав Г2.

В связи с этим, рекомендовать состав Г2 с высокодисперсным наполнителем, который разработан в УлГТУ, для внедрения на операции плоского шлифования периферией круга матриц и пуансонов из инструментальной стали Х12М, HRC 55...60, в механическом цехе ООО «Автопромэко».

Представители  
ООО «Автопромэко»

Начальник участка

 \_\_\_\_\_ Землянов С.Н.

Представитель УлГТУ

Зав лабораториями каф. «Технология машиностроения»

 \_\_\_\_\_ Степанов А.В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Результаты исследования процесса шлифования с применением ТСМ кругом К1, материал М1

Номер опыта	$S_{ep}$ , мм	$V_{cm}$ , м/мин	Состав ТСМ	$T_k$ , °С	$P_z$ , Н	$P_y$ , Н	$K_p$
1	0,01	5	Г2	479	47,5	64,25	0,74
2	0,03	5	Г2	513	63,25	78,75	0,8
3	0,01	15	Г2	547	74,5	91,25	0,82
4	0,03	15	Г2	579	79	98,5	0,8
5	0,01	5	Г5	514	51,25	71,56	0,72
6	0,03	5	Г5	552	52,75	74,06	0,71
7	0,01	15	Г5	583	76,75	101,56	0,76
8	0,03	15	Г5	607	83,5	116,25	0,72
9	0,01	5	Д1	380	54,4	70,5	0,77
10	0,03	5	Д1	455	56,4	88	0,64
11	0,01	15	Д1	538	58,2	80,6	0,72
12	0,03	15	Д1	577	66,4	96	0,69
13	0,01	5	Д4	426	36	49,25	0,73
14	0,03	5	Д4	539	52,75	59,25	0,89
15	0,01	15	Д4	541	49	72,25	0,68
16	0,03	15	Д4	614	57,75	93,5	0,62
17	0,01	5	М1	526	36,75	50,5	0,73
18	0,03	5	М1	554	48,75	60,75	0,8
19	0,01	15	М1	673	60,25	80,25	0,75
20	0,03	15	М1	747	75,5	90,75	0,83
21	0,01	5	А	462	59,25	80,94	0,73
22	0,03	5	А	506	75,75	96,5	0,78
23	0,01	15	А	559	80	103,25	0,77
24	0,03	15	А	637	89,75	117,5	0,76

## ПРИЛОЖЕНИЕ М

Результаты исследования процесса шлифования с применением ТСМ кругом К2, материал М1

Номер опыта	$S_{\text{ср}}$ , мм	$V_{\text{ср}}$ , м/мин	Состав ТСМ	$T_k$ , °С	$P_z$ , Н	$P_y$ , Н	$K_p$
1	0,01	5	Г2	489	35,25	44,5	0,79
2	0,03	5	Г2	507	40,75	47,5	0,86
3	0,01	15	Г2	534	45	56	0,8
4	0,03	15	Г2	555	49	65,8	0,74
5	0,01	5	Г5	457	33,25	47,4	0,7
6	0,03	5	Г5	470	44,25	54	0,82
7	0,01	15	Г5	476	46	61,4	0,75
8	0,03	15	Г5	517	63,75	66,8	0,95
9	0,01	5	Д1	434	28,2	40,2	0,7
10	0,03	5	Д1	495	34	54,4	0,63
11	0,01	15	Д1	515	40,4	47,2	0,86
12	0,03	15	Д1	543	56	71	0,79
13	0,01	5	Д4	465	38,75	45,5	0,85
14	0,03	5	Д4	478	42,75	54,8	0,78
15	0,01	15	Д4	496	54	70	0,77
16	0,03	15	Д4	592	65	77,5	0,84
17	0,01	5	М1	472	50,75	59	0,86
18	0,03	5	М1	596	59,5	79	0,75
19	0,01	15	М1	673	67,5	87,75	0,77
20	0,03	15	М1	767	76,25	96	0,79
21	0,01	5	А	459	58	63,5	0,91
22	0,03	5	А	498	74,75	96	0,78
23	0,01	15	А	529	77,75	104,5	0,74
24	0,03	15	А	703	87,75	119,25	0,74

## ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Результаты исследования процесса шлифования с применением ТСМ кругом КЗ, материал М1

Номер опыта	$S_{\text{вр}}$ , мм/дв.ход	$V_{\text{ст}}$ , м/мин	Состав ТСМ	$T_k$ , °С	$P_z$ , Н	$P_y$ , Н	$K_p$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,01	5	Г2	512	36,75	49	0,6
2	0,03	5	Г2	522	45,25	53	0,68
3	0,01	15	Г2	559	47	67,5	0,56
4	0,03	15	Г2	577	51,5	84,25	0,49
5	0,01	5	Г5	584	43,5	55	0,63
6	0,03	5	Г5	604	51,25	63,75	0,64
7	0,01	15	Г5	622	56,6	75,5	0,6
8	0,03	15	Г5	645	67,5	87	0,62
9	0,01	5	Д1	452	42,2	68	0,62
10	0,03	5	Д1	493	49,6	75,25	0,66
11	0,01	15	Д1	552	52,2	88,5	0,59
12	0,03	15	Д1	639	61,6	107	0,58
13	0,01	5	Д4	516	38,5	47,75	0,65
14	0,03	5	Д4	549	46,5	54	0,69
15	0,01	15	Д4	583	51,25	64,5	0,64
16	0,03	15	Д4	701	62	94,25	0,53
17	0,01	5	М1	607	49,75	54,5	0,73
18	0,03	5	М1	677	52,5	59,5	0,71
19	0,01	15	М1	705	55,5	64,25	0,69
20	0,03	15	М1	813	61,5	70,25	0,7
21	0,01	5	А	568	49,75	53	0,75
22	0,03	5	А	617	53,75	57	0,75
23	0,01	15	А	645	56,75	66,75	0,68
24	0,03	15	А	703	69,25	87	0,64
25	0,01	5	Г2А5	521	46,75	54,5	0,69
26	0,03	5	Г2А5	563	57,25	67	0,68
27	0,01	15	Г2А5	578	58,75	79	0,59
28	0,03	15	Г2А5	636	62	82,75	0,6
29	0,01	5	Г2М5	373	31,7	68,5	0,65
30	0,03	5	Г2М5	469	32,8	73,75	0,62
31	0,01	15	Г2М5	521	40,1	77,5	0,62
32	0,03	15	Г2М5	553	44,5	102,25	0,52
33	0,01	5	Д1А5	348	31,5	57	0,44
34	0,03	5	Д1А5	545	32,25	75,75	0,36
35	0,01	15	Д1А5	538	45,5	78,75	0,46

**ОКОНЧАНИЕ ПРИЛ.Н**

1	2	3	4	5	6	7	8
36	0,03	15	Д1А5	593	59,5	83,5	0,57
37	0,01	5	Д1М5	445	36,6	56	0,65
38	0,03	5	Д1М5	481	39,4	67,5	0,58
39	0,01	15	Д1М5	546	45,4	73,5	0,62
40	0,03	15	Д1М5	629	49,6	90,25	0,55

## ПРИЛОЖЕНИЕ О

Результаты исследования процесса шлифования с применением ТСМ кругом К1, материал М1

Номер опыта	$S_{ср}$ , мм/дв. ход	$V_{сш}$ , м/мин	Состав ТСМ	$Ra$ , мкм	$Rz$ , мкм	$Rmax$ , мкм
1	0,01	5	Г2	0,2	1,33	1,55
2	0,03	5	Г2	0,24	1,5	2,02
3	0,01	15	Г2	0,16	1,05	1,2
4	0,03	15	Г2	0,19	1,15	1,27
5	0,01	5	Г5	0,24	1,47	1,9
6	0,03	5	Г5	0,26	1,5	1,96
7	0,01	15	Г5	0,15	0,96	1,26
8	0,03	15	Г5	0,2	1,23	1,47
9	0,01	5	Д1	0,13	0,97	1,18
10	0,03	5	Д1	0,14	1,04	1,46
11	0,01	15	Д1	0,4	2,11	2,64
12	0,03	15	Д1	0,41	2,32	3,01
13	0,01	5	Д4	0,26	1,49	2
14	0,03	5	Д4	0,27	1,56	2,06
15	0,01	15	Д4	0,23	1,34	1,69
16	0,03	15	Д4	0,28	1,65	2,31
17	0,01	5	М1	0,25	1,21	1,56
18	0,03	5	М1	0,28	1,48	1,97
19	0,01	15	М1	0,27	1,5	1,99
20	0,03	15	М1	0,31	1,63	2,27
21	0,01	5	А	0,16	1,17	1,5
22	0,03	5	А	0,19	1,2	1,54
23	0,01	15	А	0,17	1,18	1,44
24	0,03	15	А	0,19	1,2	1,49

## ПРИЛОЖЕНИЕ О

Результаты исследования процесса шлифования с применением ТСМ кругом К2, материал М1

Номер опыта	$S_{cp}$ , мм/дв. ход	$V_{сш}$ , м/мин	Состав ТСМ	$Ra$ , мкм	$Rz$ , мкм	$Rmax$ , мкм
1	0,01	5	Г2	0,26	1,55	2,23
2	0,03	5	Г2	0,28	1,57	2,29
3	0,01	15	Г2	0,45	2,37	2,86
4	0,03	15	Г2	0,45	2,56	3,01
5	0,01	5	Г5	0,19	1,36	1,76
6	0,03	5	Г5	0,21	1,56	2,22
7	0,01	15	Г5	0,22	1,21	1,5
8	0,03	15	Г5	0,22	1,28	1,58
9	0,01	5	Д1	0,21	1,62	2,18
10	0,03	5	Д1	0,31	1,69	2,4
11	0,01	15	Д1	0,23	1,39	1,81
12	0,03	15	Д1	0,26	1,59	2,25
13	0,01	5	Д4	0,14	0,97	1,39
14	0,03	5	Д4	0,15	1,25	1,55
15	0,01	15	Д4	0,2	1,18	1,62
16	0,03	15	Д4	0,21	1,34	1,87
17	0,01	5	М1	0,22	1,28	1,62
18	0,03	5	М1	0,23	1,39	1,82
19	0,01	15	М1	0,26	1,51	2,13
20	0,03	15	М1	0,31	1,65	2,43
21	0,01	5	А	0,16	1,14	1,5
22	0,03	5	А	0,19	1,3	1,54
23	0,01	15	А	0,21	1,4	1,86
24	0,03	15	А	0,25	1,95	2,66

## ПРИЛОЖЕНИЕ П

Результаты исследования процесса шлифования с применением ТСМ кругом КЗ, материал М1

Номер опыта	$S_{\text{ср}}$ , мм/дв.ход	$V_{\text{ср}}$ , м/мин	Состав ТСМ	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_{\text{max}}$ , мкм
1	2	3	4	5	6	7
1	0,01	5	Г2	0,09	0,72	0,86
2	0,03	5	Г2	0,12	0,88	1,04
3	0,01	15	Г2	0,12	0,89	1,23
4	0,03	15	Г2	0,21	1,56	2,31
5	0,01	5	Г5	0,11	0,91	1,36
6	0,03	5	Г5	0,21	1,66	1,94
7	0,01	15	Г5	0,12	0,89	1,06
8	0,03	15	Г5	0,3	1,64	2,12
9	0,01	5	Д1	0,13	1	1,21
10	0,03	5	Д1	0,14	1,02	1,22
11	0,01	15	Д1	0,13	1,05	1,38
12	0,03	15	Д1	0,29	1,7	2,08
13	0,01	5	Д4	0,14	1,08	1,73
14	0,03	5	Д4	0,27	1,46	2,03
15	0,01	15	Д4	0,39	1,88	2,54
16	0,03	15	Д4	0,42	2,32	3,01
17	0,01	5	М1	0,12	0,95	1,34
18	0,03	5	М1	0,14	1,09	1,45
19	0,01	15	М1	0,24	1,3	1,56
20	0,03	15	М1	0,25	1,46	2,01
21	0,01	5	А	0,17	1,26	1,56
22	0,03	5	А	0,3	2,05	2,73
23	0,01	15	А	0,19	1,33	1,6
24	0,03	15	А	0,2	1,39	1,68
25	0,01	5	Г2А5	0,12	1,11	1,44
26	0,03	5	Г2А5	0,3	1,55	2,06
27	0,01	15	Г2А5	0,28	1,48	2,38
28	0,03	15	Г2А5	0,32	1,93	2,59
29	0,01	5	Г2М5	0,15	1,12	1,28
30	0,03	5	Г2М5	0,19	1,19	1,44
31	0,01	15	Г2М5	0,32	1,94	2,46
32	0,03	15	Г2М5	0,34	1,95	2,46
33	0,01	5	Д1А5	0,12	0,96	1,19
34	0,03	5	Д1А5	0,12	1,01	1,38
35	0,01	15	Д1А5	0,16	1,15	1,33

**ОКОНЧАНИЕ ПРИЛ.П**

1	2	3	4	5	6	7
36	0,03	15	Д1А5	0,17	1,19	1,35
37	0,01	5	Д1М5	0,19	1,27	1,53
38	0,03	5	Д1М5	0,21	1,47	2,42
39	0,01	15	Д1М5	0,19	1,23	1,58
40	0,03	15	Д1М5	0,22	1,42	1,98