На правах рукописи

## 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)

# АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ульяновск, 2017

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Веткасов Николай Иванович, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Носенко Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор,

заместитель директора по учебной работе,

заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского

политехнического института – филиала

Волгоградского государственного технического

университета

Осипов Александр Петрович, кандидат технических наук, доцент

декан механического факультета, заведующий

кафедрой «Технология машиностроения» Сызранского филиала Самарского государственного технического

университета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Пермский национальный исследовательский

политехнический университет»

Защита диссертации состоится 9 ноября 2017 г. в 11.00 на заседании объединенного диссертационного совета Д999.003.02, созданного на базе федерального государственного образования учреждения высшего образовательного государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый учебный корпус, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта:www.ulstu.ru.

AB	тореферат разослан	**	
66	,, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	2017	Γ.

Ученый секретарь диссертационного совета, УЗа Веткасов Н. И. доктор технических наук

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В современных условиях развития рыночной экономики повышение производительности и качества выпускаемой продукции является решающим фактором повышения конкурентоспособности предприятий. Как правило, геометрические параметры и физико-механические свойств материала деталей формируются на операциях окончательной обработки, значительное место среди которых занимают операции шлифования.

Для повышения производительности шлифования и улучшения качества шлифованных деталей применяют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Однако есть целый ряд технологических операций, где применение СОЖ ограничено. Выходом из таких ситуаций является применение твердых смазочных материалов (ТСМ).

Разработаны и применяются на практике ТСМ различных составов и способы их нанесения на рабочие поверхности абразивных инструментов (АИ). Как правило, ТСМ состоят из связующего и наполнителя с добавлением различных присадок. В качестве наполнителей используют дисульфид молибдена, оксиды, бориды и нитриды металлов. В последнее время исследованию эффективности определенное внимание уделяют применения наполнителями которых являются порошки относительно дешевых высокодисперсных материалов. Использование природных наполнителей, например, природных высокодисперсных порошков голубой глины, имеющей ламеллярную структуру содержащей по массе до 20 % наноструктурированного материала (монтморелонита), способствует снижению интенсивности контактного взаимодействия обрабатываемой заготовки и АИ. Введение в состав ТСМ наноматериалов оказывает благоприятное воздействие на обстановку в зоне контакта взаимодействующих тел, о чем свидетельствуют результаты исследований Яхеева Н. Я., Перекрестова А. П., Ильина А. П. и др. Однако, вопросы исследования влияния высокодисперсных природных материалов и нанонаприсадок на эффективность применения ТСМ на шлифовальных операциях до сих пор остаются открытыми, что свидетельствует об актуальности темы настоящего исследования.

**Целью диссертационной работы является** повышение производительности шлифования и улучшения качества поверхностей шлифованных деталей и режущих инструментов путем применения TCM с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

## Для достижения поставленной цели, решены следующие задачи:

1. Разработана теплофизическая модель процесса шлифования с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, позволяющая определять температуру в зоне контакта шлифовального круга (ШК) и заготовки с учетом перехода ТСМ из твердого агрегатного состояния в жидкое, на примере плоского шлифования периферией круга. 2. Выполнено численное моделирование формирования температурного поля при различных режимах обработки с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками. 3. Разработана математическая модель шероховатости поверхности, шлифованную с применением ТСМ, позволяющая рассчитать высотные параметры шероховатости с учетом состава и расхода ТСМ для широкого диапазона условий шлифования. 4. Разработаны составы ТСМ, методика определения смазочного действия ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками. 5. Проведены исследования технологической эффективности плоского шлифования с применением ТСМ высокодисперсными наполнителями и антифрикционными присадками.

6. Получены 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 быстрорежущих сталей. 7. Оценена экономическая эффективность применения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками в условиях действующего производства. 8. Разработаны рекомендации по применению ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками при плоском шлифовании, позволяющие выбирать ТСМ, технические приемы и технику их применения.

#### Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны теплофизическая модель и методика численного расчета температурного поля в заготовке, шлифованной с применением TCM;
- разработана математическая модель шероховатости поверхностей деталей, шлифованных с применением ТСМ;
- получены регрессионные зависимости для расчета показателей технологической эффективности применения TCM при плоском шлифовании периферией круга;
- разработаны на уровне изобретения новые составы ТСМ, предназначенные для применения при шлифовании заготовок деталей машин и заточке РИ.

#### Практическая значимость и реализация результатов работы:

- разработаны новые составы ТСМ;
- результаты теоретико-экспериментальных исследований технологической эффективности
   ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками;
- разработаны технологические рекомендации по применению ТСМ при плоском шлифовании и заточке РИ;
- разработаны конструкции устройств для подачи ТСМ на рабочую поверхность ШК;

Опытно-промышленными испытаниями подтверждена эффективность разработанных ТСМ. Результаты теоретико-экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс подготовки студентов машиностроительного факультета УлГТУ.

**Методология и методы исследования:** Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, теории математического моделирования с использованием численно-аналитических методов и методов математической статистики. Экспериментальные исследования проведены на натурных образцах в лабораторных и производственных условиях с использованием аттестованных измерительных средств, методов регрессионного анализа и численного компьютерного моделирования.

## На защиту выносятся:

- 1. Теплофизическая модель процессов шлифования и математическая модель шероховатости поверхностей заготовок, шлифованных с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.
- 2. Методика и результаты численного моделирования температурного поля заготовки при плоском шлифовании заготовок деталей и заточки РИ с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

- 3. Методика и результаты расчета высотных параметров шероховатости шлифованной поверхности при плоском шлифования заготовок деталей и заточки РИ с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.
- 4. Результаты экспериментальных исследований эффективности плоского шлифования с применением ТСМ, включая исследования теплосиловой напряженности процесса шлифования и микрогеометрии обработанной поверхности.
- 5. Рекомендации по применению TCM с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на операции плоского шлифования заготовок деталей и заточки РИ.
- 6. Конструкции устройств для автоматизированной подачи TCM в твердом и жидком агрегатном состояниях на рабочую поверхность ШК.

Стинень достоверности результатов исследований и обоснованность положений и практических рекомендаций по работе подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных данных, полученных с помощью современных методик и аналитической аппаратуры, и соответствием полученных данных с результатами исследований других авторов в области применения ТСМ и реализации процесса шлифования.

Новизна технических решений и программных продуктов подтверждается одним патентом на изобретение и тремя свидетельствами  $P\Phi$  о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация результатов работы: Основные результаты работы доложены на 25 форумах и конференциях: всероссийской конференции «Автоматизация и информационные технологии» (Москва, 2012); молодежном инновационном форуме Приволжского федерального округа (Ульяновск, 2010); международной научно-технической конференции (МНТК) «Молодая наука XXI века» (Украина, Краматорск, 2010); всероссийской выставке HTTM-2010 (Москва, 2010); смене Зворыкинского проекта «Инновации и техническое творчество» форума Селигер-2010 (2010); молодежном конкурсе им. Ю. А. Гагарина (Москва, 2011); МНТК «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (Москва, 2012), МНТК «Молодая наука XXI века» (Украина, Краматорск, 2013); молодёжной конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике» (Звездный городок, 2013 г.); всероссийской конференции "Будущее машиностроения России" (Москва, 2014); МНПК «Современные наукоемкие технологии: приоритеты развития и подготовки кадров» (Казань, 2014); 4-ой МНПК «Техника и технологии машиностроения» (Омск, 2015); МНТК «Гагаринские чтения» (Москва, 2015); 4-ой МНТК «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Тольятти, 2015); МНПК «Моделирование в технике и экономике» (Витебск, 2016) и др.

В полном объеме диссертационная работа докладывалась на научно-технических семинарах кафедр «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» Ульяновского государственного технического университета.

Результаты диссертационного исследования прошли опытно-промышленную апробацию на ООО «Сервиз-Газ», ООО «Димитровградский инструментальный завод», ООО «Автопромэко». Спроектированы и изготовлены опытные образцы устройств для применения ТСМ, реализованы промышленным предприятиям опытные партии карандашей ТСМ.

**Публикации**: по теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 2 в изданиях из перечня ВАК Р $\Phi$ , получен 1 патент на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программного продукта для ЭВМ.

*Структура и объем работы:* диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (101 наименование) и приложений (30 страниц), включает 175 страниц машинописного текста, 67 рисунков и 23 таблицы.

#### 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, поставлена цель и определены задачи исследований, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ научно-технической и патентной информации по современному состоянию применения ТСМ при шлифовании заготовок деталей машин и заточке режущих инструментов (РИ). Показано, что применение ТСМ является одним из перспективных способов повышения эффективности шлифования.

Вопросами применения ТСМ занимались И.В. Ашихмин, В.Ф. Безъязычный, Г.П. Кремнев, В.П. Ларшин, В.С. Лобанцова, В.А. Панайоти, П.А. Рутман, Л.В. Худобин, А.В. Якимов и др. В результате исследований были предложены составы ТСМ и способы их применения, разработана методика выбора состава ТСМ и способа его подачи в зону обработки, исходя из требований к формированию поверхностных слоев шлифованных деталей с заданным уровнем эксплуатационных характеристик.

Одним из способов улучшения трибологических характеристик ТСМ и уменьшения силы трения в зоне контакта трущихся тел является введение в их состав элементов, усиливающих смазочное действие. В число таких элементов входят высокодисперсные частицы природных материалов (диатомита, голубой глины и др.), нанопорошки металлов (алюминия, меди и др.) и аллотропных углеродных соединений. Хотя результаты исследований Ильина А. П., Перекрестова А. П., Яхеева Н. Я. и др. свидетельствуют о том, что введение в состав ТСМ наноматериалов благоприятно воздействует на теплосиловую напряженность контактирующих объектов, научное обеспечение технологий шлифования с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками не разработано, а, следовательно, исследования предпринимаемые с этой целью, по-прежнему актуальны.

В заключение первой главы сформулирована цель и поставлены задачи работы, приведенные выше.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментального исследования смазочного действия ТСМ в зоне шлифования (рис. 1). Исследование смазочного действия 10 составов ТСМ (табл. 1) проводили по схеме «вал – колодка» на установке, смонтированной на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2.

В качестве пары трения использовали быстровращающийся (окружная скорость 35 м/с) металлический диск из стали P6M5 и абразивный брусок 20x20x150 25A F60 M 5 V A, закрепленный на столе станка. В ходе эксперимента варьировали температурой в зоне контакта диска и бруска в диапазоне от 20 до 80  $^{0}$ C, которую создавали путем подогрева зоны контакта с помощью плазмотрона.

#### 1. Составы ТСМ

No	Обозна	Компоненты, % масс.						
сост	чение	Связу	Наполнитель				Присадка	
ава	состава	ющее	Высокодисперсный				Нанопорошок	
		Параф	Дисульфид	Графит	Диатомит	Голубая		
		ИН	молибдена			глина	меди	алюминия
1	2	3		5	6	7	8	9
1	Γ2	60	_	_	_	40	_	_
2	Г5	60	_	15	_	25	_	_
3	Д1	60	_	_	40	_	_	_
4	Д4	60	_	15	25	_	_	_
5	M1	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	A*							

Примечание\* - состав 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) оказало положительное влияние на величину коэффициента трения, который был на уровне коэффициента трения базового состава М1. Анализ смазочного действия ТСМ на разработанной установке, моделирующей процесс плоского шлифования периферией круга, показал отсутствие четкой корреляции между коэффициентом трения, определенным по предложенной методике, силой шлифования и средней контактной температурой, определенными при выполнении реального процесса шлифования.

На основании этого был сделан вывод, что ввиду большой разницы температур при физическом моделировании процесса трения и реальном процессе шлифования, объективно ранжировать ТСМ по эффективности смазочного действия, оцениваемого вне процесса резания (на машине трения) не представляется возможным. Поэтому в дальнейшем оценку влияния ТСМ на эффективность плоского шлифования проводили по показателям, определяемым в процессе шлифования (параметры шероховатости шлифованной поверхности, средняя контактная температура и др.).

Для оценки периодичности нанесения ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками на рабочую поверхность ШК по методике Л.В. Худобина и Н.И. Веткасова проводили оценку расхода исследуемых составов ТСМ в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, анализ которой показал значительный разброс периодичности нанесения исследуемых составов ТСМ. Периодичность нанесения ТСМ в зависимости от состава колебалась в пределах от 8 до 30 мин.

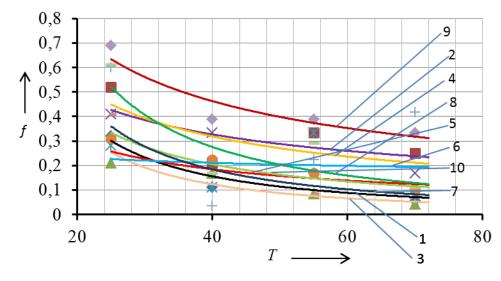


Рис. 1. Аппроксимированные зависимости коэффициента трения f от температуры в зоне трения T,  $^{\circ}C$ , при применении различных TCM:1-10 — номера TCM по табл. 1

Ниже представлена математическая модель (ММ) высотных параметров шероховатости поверхности заготовки, шлифованной периферией круга с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, учитывающая их расход. В основу новой ММ положена модель Л. В. Худобина и М.А. Белова, в которой выходное значение параметра шероховатости шлифованных поверхностей *Ra* зависит от состава смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС), характеристики АИ, режимов шлифования, амплитуды колебаний ШК. В предлагаемой модели учитывается расход ТСМ, существенным образом влияющий на эффективность процесса шлифования.

При разработке ММ 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 (a3)  $H_{0}$ 0, зависящую от динамической характеристики процесса шлифования, а также от статической разновысотности активных зерен  $H_{0}$ 0, соответствующей глубине залегания половины из всех выступающих над связкой зерен, измеренной от вершины наиболее выступающего абразивного зерна.

Динамическая разновысотность активных  $a_3$  равна, согласно Л.В. Худобина и М.А. Белова,:

$$H_{0_{\mathrm{J}}}(\tau) = e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0\mathrm{CT}}}{\sigma_{\mathrm{CT}}} \sqrt{(1+\beta)\sigma_{\mathrm{CT}}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot \mathrm{A}\mu(\tau)^2}, \tag{1}$$

где  $\sigma_{\text{CT}}^2$  — дисперсия статического распределения статической разновысотности активных зерен, мм²; определяется по формуле:  $\sigma_{\text{CT}}^2 = 0.2h_a^2$ ;  $h_a$  — толщина слоя абразива, снимаемого вершиной правящего инструмента при правке, мм;  $\beta = 0.1 \div 0.2$  — коэффициент;  $H_{0_{\text{CT}}}$  — статическая разновысотность зерен рабочей поверхности шлифовального круга, равна:  $H_{0_{\text{CT}}} = h_0/\sqrt[k]{F(h_{CK})}$ ;  $h_0$  — расстояние уровня скалывания активных зерен от наиболее выступающих вершин зерен, соответствующее заданной вероятности, в мм; k — показатель степени;  $F(h_{CK})$  — функция распределения вершин зерен после правки круга; Ад ( $\tau$ ) — амплитуда динамических колебаний ШК, мм:

$$A_{\mathcal{A}}(\tau) = \frac{j_{\mathcal{C}} \cdot A_{\mathsf{CT}} \cdot (\mu_{\mathsf{0}}/\mu)^{p} s^{K_{\mathsf{COTC}} m_{\mathsf{0}} \tau}}{j_{\mathcal{C}} + j_{\mathcal{P}}},\tag{2}$$

где  $j_c$ ,  $j_p$  — жесткость технологической системы и жесткость системы резания, Н/мм;  $A_{c\tau}$  — амплитуда статических колебаний ШК, мкм; $K_{\text{СОТС}}$ —коэффициент, учитывающий влияние состава СОТС на изменение амплитуды динамических колебаний;  $\mu_0$ ,  $\mu$  — вязкость эталонного и проверяемого СОТС соответственно,  $\Pi \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}$ ; Р — показатель степени, определяемый теоретически или экспериментально;  $\tau$  — время шлифования,  $\mathbf{c}$ ;  $m_0$  — показатель степени, характеризующий интенсивность роста амплитуды колебаний при шлифовании  $\mathbf{c}$  эталонным СОТС.

Однако, формула (2) не учитывает расход СОТС, находящегося в зоне шлифования.

Как показали исследования Е. С. Киселева изменение расхода СОТС квазилинейно приводит к изменению шероховатости шлифованной поверхности. Поэтому в расчете динамической разновысотности *аз* на рабочей поверхности ШК следует учитывать не только изменение амплитуды во времени и влияние на неё СОТС, но и его расход Q. В связи с этим, зависимость для расчета амплитуды динамических колебаний **Ад** при применении ТСМ будет иметь вид:

$$A_{\mathsf{Д}}(\tau, Q) = \mathbf{A}_{\mathsf{CT}} \cdot K_{\mathsf{TCM}} \cdot \frac{j_{\mathsf{C}}}{j_{\mathsf{C}} + j_{\mathsf{P}}} \cdot Q^{\varepsilon} \cdot \tau^{\varphi},$$
 (3)

где  $K_{\text{ТСМ}}$  — коэффициент, учитывающий влияние состава ТСМ на изменение амплитуды динамических колебаний;  $\varepsilon$  — коэффициент, учитывающий изменение амплитуды динамических колебаний в зависимости от расхода ТСМ;  $\varphi$  - коэффициент, учитывающий изменение амплитуды динамических колебаний в зависимости от времени шлифования.

С учетом выражений (1) – (3) ММ среднего арифметического отклонения профиля Ra запишем в виде:

$$Ra(\tau) = K_{3_1} \cdot R[H_{0_{II}}(\tau, Q)]^{f_1};$$
 (4)

где  $K_{3_1}$  — коэффициент, учитывающий влияние засаливания рабочей поверхности круга и связанных с этим явлений схватывания металла заготовки с налипшими на круг частицами стружки; можно принять  $K_{3_1}=1,0$  при шлифовании заготовок из углеродистых и низколегированных сталей; при шлифовании заготовок из химически и адгезионно активных материалов  $K_{3_1}=1,0$  в случае работы «острым» кругом. В других случаях —  $K_{3_1}=1,1\div 1,6$  (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;  $f_I$  — показатель степени.

Окончательно ММ среднего арифметического отклонения профиля *Ra* шлифованной поверхности с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадкам*и* может быть представлена в виде:

$$Ra(\tau,Q) = K_{3_1} \cdot R \left[ e^{q\tau} \cdot \frac{H_{\text{OCT}}}{\sigma_{\text{CT}}} \sqrt{(1+\beta)\sigma_{\text{CT}}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot A \mu(\tau,Q)^2} \right]^{f1}, \tag{5}$$

Таким образом, получена MM формирования среднего арифметического отклонения профиля *Ra* шлифованной поверхности с учетом свойств и расхода TCM.

Для автоматизации расчета шероховатости поверхностей, шлифованных с применением TCM, по предложенной модели была написана программа на языке C++.

Для оценки влияния материала наполнителя и наноприсадок на шероховатость обработанной поверхности при плоском шлифования периферией круга выполнили расчет по разработанной программе значений параметра Ra при применении восьми TCM с наполнителями из высокодисперсных порошков голубой глины и диатомита и присадками из нанопорошков меди и алюминия (см. табл. 1) при варьировании врезной подачей  $S_{ep}$  в диапазоне от 0,01 до 0,03 мм/дв.ход. В качестве базы для сравнения были взяты TCM на основе дисульфида молибдена (состав M1, см. табл. 1) и TCM производства НПО «Алтай» (состав A, см. табл. 1).

Оценка адекватности разработанной модели выполнена сравнением результатов теоретического моделирования с результатами натурного эксперимента, проведенного по методике, изложенной в главе 3.

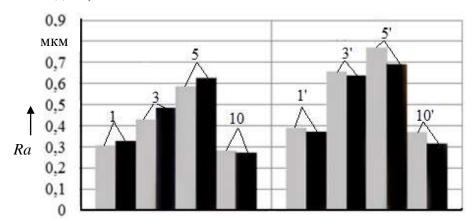


Рис. 2. Шероховатость Ra поверхности, шлифованной кругом 1 300° 40° 76° 25A F60 М 5 V A: 1, 3, 5, 10 — номера составов ТСМ по табл. 1;  $\tau = 1$  мин; 1°,3°,5°,10° —  $\tau = 4$  мин; — расчетное значение; — экспериментальное значение

По результатам сравнения расчетных и экспериментальных значений Ra (рис. 2) установлено, что их расхождение не превышает 13 %, что свидетельствует о достаточно высокой степени адекватности разработанной модели среднего арифметического отклонения профиля шлифованной поверхности Ra.

Для моделирования влияния ТСМ на формирование температурного поля при плоском шлифовании периферией круга рассмотрим систему ШК — заготовка. При анализе теплового взаимодействия ШК и заготовки примем, что температурное поле двухмерное (T = f(z,x)), учитывая, что высота круга существенно меньше его диаметра, а температура в различных точках со временем изменяется незначительно. Учитывая непостоянство условий распределения теплоты в обрабатываемой заготовке в течение цикла шлифования, считаем, что

температурное поле нестационарное  $\left(\frac{dT}{d\tau} \neq 0\right)$ .

Математическая формулировка задачи теплопроводности применительно к нестационарному двухмерному температурному полю заготовки в прямоугольной системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T(T) \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right],\tag{6}$$

где T - текущее значение температуры в заготовке, K;  $a_T$  - коэффициент температуропроводности материала заготовки,  $M^2/C$ ; x, z - координаты заготовки, M.

Разработка ММ, позволяющей проводить детальное исследование влияния ТСМ на теплонапряженость процесса шлифования, предполагает обоснование комплекса начальных и граничных условий, учитывающих условия контактного взаимодействия ШК и заготовки в

присутствии ТСМ. При анализе температурного поля в обрабатываемой заготовке считаем её однородной, выполненной из сплошного материала (сплошная среда) с известными теплофизическими свойствами и их зависимостями от температуры. Для корректного решения рассматриваемой тепловой задачи учтем начальные условия, определяющие распределение температуры в любой точке круга, заготовки и ТСМ в некоторый начальный момент времени  $\tau_0$  = 0, принятый за начало отсчета. Чаще всего температуру контактирующих тел принимают равной температуре окружающей среды 293 °К.

Из бесчисленного множества возможных явлений, описываемых уравнением (6), граничными условиями выделим описание теплообмена между поверхностями круга, заготовки и ТСМ, а также с окружающим воздухом и элементами технологической оснастки. В пределах зоны контакта круга и заготовки:

$$T_{\kappa} = T_{3} = T_{\kappa p.}$$

$$\frac{P_{z}(V_{\kappa} + V_{cm})}{S} = \lambda_{\kappa} \left(\frac{dT_{\kappa}}{dr}\right) + \lambda_{s} \left(\frac{dT_{s}}{dx}\right) + Q_{TCM} + Q_{crp},$$
(7)

где  $P_z$  – касательная составляющая силы шлифования, H;  $V_{\kappa}$  – окружная скорость круга, м/c; S – фактическая площадь контакта ШК с заготовкой, м²;  $R_{\kappa}$  – радиус наружной окружности ШК, м;  $V_{cm}$  – скорость стола, м/мин;  $T_{\kappa p}$  – температура ШК, °К;  $T_{\mathfrak{z}}$  – температура заготовки, °К;  $Q_{TCM}$  поверхностная плотность теплового потока, поступающего в ТСМ,  $\mathrm{BT/M}^2$ ;  $Q_{\mathrm{стp}}$  – поверхностная плотность теплового потока, поступающего в стружку,  $\mathrm{BT/M}^2$ .

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

$$Q_{\rm cro} = c_{\rm s} \cdot m_{\rm cr} \cdot (T_{\rm k} - T_{\rm sh}) / S \cdot \tau, \tag{8}$$

где  $c_3$  — теплоемкость материала обрабатываемой заготовки Дж/(кг · °К);  $T_{3H}$  — начальная температура заготовки, принимаем  $T_{3H}$  = 293 °К;  $T_{\kappa}$  — средняя контактная температура в зоне обработки, °К;  $\tau$  - время действия теплового источника на длине дуги контакта  $L_{\kappa}$ , с;  $m_{cm}$  — масса стружки при шлифовании элементарного участка поверхности заготовки длиной  $L_{\kappa}$ , кг.  $m_{cmp}$  вычислим по формуле:

$$m_{\rm crp} = \rho_{\rm s} \cdot L_{\rm K} \cdot S_{\rm Ep} \cdot H_{\rm K}, \tag{9}$$

где  $\rho_3$  – плотность материала обрабатываемой заготовки кг/м $^3$ ;  $S_{sp}$  – врезная подача, мм/ход. Поверхностная плотность теплового потока, поступающего в ТСМ,

$$Q_{TCM} = Q_{CB} + Q_{Han}, \tag{10}$$

где  $Q_{cs}$  – поверхностная плотность теплового потока, затрачиваемого на плавление связующего,  $\mathrm{Bt/m}^2$ ;  $Q_{han}$  – поверхностная плотность теплового потока, затрачиваемого на нагрев наполнителя, Дж.

$$Q_{cs} = (c_{cs} \cdot m_{cs} \cdot (T_{n\pi as} - T_{Hay}) + m_{cs} q_c) / S \cdot \tau, \tag{11}$$

где  $c_{cs}$  – теплоемкость связующего, Дж/(кг· °К);  $T_{нaq}$  – начальная температура ТСМ, К;  $T_{nnas}$  – температура плавления связующего, °К;  $m_{cs}$  – масса ТСМ, расплавившегося при шлифовании элементарного участка длиной  $L_{\kappa}$ , кг;  $q_c$  – удельная теплота плавления,  $\mathcal{Д}$ жс/ $\kappa$ г.  $m_{cs}$  найдем по выражению:

$$m_{cs} = \frac{\rho_{\text{CB}} \cdot L_K \cdot S_{\text{Bp}} \cdot 2 \cdot c_{\text{C}} \cdot (T_{\Pi \Pi} - T_{\text{OC}}) \cdot \sqrt{\frac{a_C \cdot L_K}{\pi \cdot V_K}}}{q_C + c_C \cdot (T_{\Pi \Pi} - T_{\text{OC}})},$$
(12)

где  $a_c$  — коэффициент температуропроводности, м²/с;  $T_{oc}$  — температура окружающей среды, °К. Поверхностная плотность теплового потока, поступающего в заготовку,

$$Q_{z} = \psi \cdot Q_{\Sigma} \quad , \tag{13}$$

где  $\psi$ - коэффициент, показывающий, какая доля теплоты, выделившейся в контактной зоне, поступает в заготовку.

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

$$-\lambda_{\rm K} \left( \frac{dT_{\rm K}}{dr_{\rm v}} \right) = \alpha_{\rm EK} (T_{\rm KP} - T_{\rm oc}), \tag{14}$$

где  $\alpha_{\sf ex}$  — коэффициент теплопередачи от поверхности ШК окружающему воздуху, Вт / (м $^2$  · K).

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

$$-\lambda_{3}\left(\frac{dT_{3}}{dx}\right) = \alpha_{\text{pac.}}(T_{3} - T_{\text{B}}): x = h, \tag{15}$$

где  $\alpha_{pac}$  — коэффициент теплопередачи воздуха при его контакте с нагретой поверхностью заготовки,  $Bm/(M^2 \cdot K)$ .

На поверхности заготовки, контактирующей с поверхностью магнитной плиты плоскошлифовального станка, температуру поверхности контакта принимаем равной температуре станка, которую считаем приблизительно равной температуре окружающей среды 293 °К.

Таким образом, разработана теплофизическая модель плоского шлифования периферией круга, в которой отражена связь теплового состояния контактирующих тел (круга и заготовки) с материалом заготовки, характеристикой круга и составом ТСМ. Учтено влияние фазового перехода ТСМ на теплонапряженность в зоне контакта.

В силу того, что априорно достаточно сложно определить составляющие теплового баланса (7) в зоне контакта и учесть изменение теплофизических свойств круга, заготовки и ТСМ в зависимости от температуры, аналитическая оценка теплового состояния заготовки и ТСМ затруднена. Поэтому ММ (6) была взята за основу конечно-элементной (КЭ) модели, созданной в программной среде ANSYS, обеспечивающей высокую точность результатов расчета. Для этого создали геометрическую модель заготовки с сеткой конечных элементов. Задали теплофизические характеристики материала заготовки, ШК и ТСМ. Для оценки влияния материала наполнителя и наноприсадок на теплонапряженность плоского шлифования периферией круга выполнили расчет в программном пакете Creo 2.0 с решателем ANSYS при применении восьми TCM с наполнителями из высокодисперсных порошков голубой глины и диатомита и присадками из нанопорошков меди и алюминия (табл. 1). В качестве базы для сравнения взяты ТСМ на основе дисульфида молибдена (состав М1, табл. 1) ТСМ производства НПО «Алтай» (состав A). Объектом КЭ моделирования являлось нестационарное температурное поле в заготовке (рис. 3). Путем численного моделирования выявили лучший, с точки зрения снижения теплообразования в зоне шлифования состав ТСМ из числа испытанных – состав, в качестве наполнителя в котором применяется голубая глина, присадки – нанопорошок меди (состав Г2М5, табл. 1), который существенным образом (на 13 – 15 %) снижает среднюю контактную температуру в зоне обработки по сравнению с составом Г2, не содержащим нанопорошка меди.

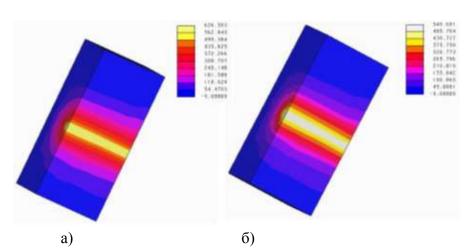


Рис. 3. Результаты численного моделирования температурного поля в заготовке, шлифуемой кругом 25A F60 M 5 V A. Режимы обработки:  $V_{cm}$ = 15 м/мин,  $S_{ep}$  = 0,03 мм/дв. ход. ТСМ: а — состав Г2,  $T_{max}$  = 626,5 °C; б — состав Г2М5,  $T_{max}$  = 540,7 °C

Оценка адекватности результатов численного моделирования выполнена сравнением с результатами натурного эксперимента, проведенного по методике, изложенной в главе 3. По результатам сравнения расчетных и экспериментальных значений  $T_{\kappa}$  (рис. 4) установлено, что их расхождение не превышает 10-15%, что свидетельствует о достаточно высокой степени адекватности разработанной компьютерной модели теплообразования в зоне шлифования.

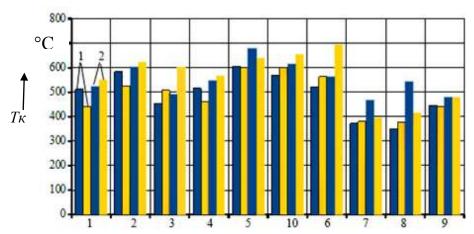


Рис. 4. Зависимость  $T_{\kappa}$  от состава ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками: материал заготовки — сталь P6M5, HRC 63...65; круг — 1 300′ 40′ 76′25A F46 M 5 V A;  $V_{cm}$ = 5 м/мин; 1 - 10 — составы ТСМ по табл. 1; —  $T_{\kappa pac^{4}}$ : —  $T_{\kappa pac^{4}}$ : —  $T_{\kappa pac^{4}}$ : 1, 2 — соответственно  $S_{\kappa p}$ = 0,01 и 0,03 мм/дв. ход

*В третьей главе* изложена методика и приведены результаты экспериментальных исследований эффективности

процесса плоского шлифования при применении TCM с высокодиспекрыми наполнителями и антифрикционными наноприсадками. Эксперименты проводили на базе автоматизированного комплекса для измерения сил шлифования и контактной температуры, смонтированного на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ВФ2. Параметры шероховатости измеряли на профилометре мод. 170622. Амплитуду динамических колебаний измеряли с помощью комплекта вибродатчиков ДН-3.

В ходе исследований фиксировали: шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемую (по ГОСТ 25142) параметрами Ra, Rz, Rmax, мкм; составляющие силы шлифования:  $P_z$  и  $P_y$ , H; среднюю контактную температуру в зоне шлифования  $T_\kappa$ , C; смазочную способность ТСМ, оцениваемую по коэффициенту трения  $f_{TP}$ ; амплитуду статических  $A_{CT}$ и динамических  $A_{J}$  колебаний ШК, мм.

Эксперименты проведены однофакторным и полным многофакторным  $2^4$  планами при шлифовании плоских заготовок размерами  $40 \times 20 \times 10$  мм из быстрорежущей стали P6M5 кругами типа 1 из электрокорунда белого 25A на керамической связке с окружной скоростью

круга 35 м/с.  $V_{cm}$  варьировали в диапазоне от 5 до 15 м/мин;  $S_{BP}$  — от 0,01до 0,03 мм/дв. ход; зернистостью круга F — от 250 до 400 мкм; твердостью круга S — от 49 до 55 звуковых индексов. В качестве ТСМ использовали восемь составов (см. табл. 1). За базу для сравнения принимали результаты шлифования с применением составов М1 и A (см. табл. 1).

По результатам многофакторного исследования получили регрессионные зависимости средней контактной температуры  $T_{\kappa}$ , составляющих сил шлифования  $P_z$  и  $P_y$ , параметров шероховатости шлифованной поверхности Ra, Rz и Rmax от скорости стола  $V_{cm}$ , врезной подачи  $S_{\rm sp}$ , твердости S и зернистости F шлифовального круга для каждого состава TCM (в качестве примера в табл. 2 приведены зависимости для составов  $\Gamma 2$  и  $\Pi 1$ ). Для оценки адекватности полученных моделей определяли расчетное F и табличное  $F_{\kappa}$  (при уровне значимости  $q_{ad} = 5$ %) значения критерия Фишера, после сравнения которых, делали вывод об их адекватности. Все полученные модели признаны адекватными.

Анализ результатов экспериментальных исследований теплосиловой напряженности показал, что на всем диапазоне варьирования параметрами процесса шлифования наибольшее снижение теплосиловой напряженности наблюдается при применении состава Г2М5 (рис. 5,а).

Анализ полученных экспериментальных и расчетных значений средней контактной температуры показал, что TCM существенным образом влияет на среднюю контактную

2. Регрессионные зависимости для расчета показателей технологической эффективности операции шлифования заготовок из стали P6M5

Состав ТСМ	Показатель	Уравнение регрессии
Γ2	$T_{\kappa}$	$144,62 \cdot S_{ep}^{0,038} \cdot V_{cm}^{0,094} \cdot F^{0,031} \cdot S^{0,346}$
	$P_z$	$173.84 \cdot S_{en}^{0.133} \cdot V_{em}^{0.224} \cdot F^{-0.915} \cdot S^{0.517}$
	$P_{y}$	$32,14 \cdot S_{sp}^{0,156} \cdot V_{cm}^{0,324} \cdot F^{0,820} \cdot S^{0,902}$
	Ra	$1,206 \cdot 10^{11} \cdot S_{ep}^{0,194} \cdot V_{cm}^{0,215} \cdot F^{1,203} \cdot S^{8,639}$
	Rz	$1,48\cdot10^9\cdot S_{ep}^{0,161}\cdot V_{cm}^{0,181}\cdot F^{0,964}\cdot S^{-6,099}$
	Rmax	$1,34 \cdot 10^9 \cdot S_{ep}^{0,185} \cdot V_{cm}^{0,145} \cdot F^{1,180} \cdot S^{-6,164}$
	Τκ	$35,31 \cdot S_{ep}^{0,101} \cdot V_{cm}^{0,198} \cdot F^{0,060} \cdot S^{0,582}$
	Pz	$0.088 \cdot S_{ep}^{-0.153} \cdot V_{cm}^{-0.230} \cdot F^{-0.903} \cdot S^{2.448}$
Д1	Py	$0,4 \cdot S_{ep}^{0,240} \cdot V_{cm}^{0,287} \cdot F^{0,859} \cdot S^{2,156}$
	Ra	$2,35\cdot10^{5}S_{ep}^{0,226}\cdot V_{cm}^{0,431}\cdot F^{0,141}\cdot S^{-3,754}$
	Rz	$2,31 \cdot 10^4 \cdot S_{ep}^{0,128} \cdot V_{cm}^{0,292} \cdot F^{0,107} \cdot S^{2,597}$
	Rmax	$7,42 \cdot 10^5 \cdot S_{ep}^{-0,16} \cdot {}^{3}V_{cm}^{-0,295} \cdot F^{0,235} \cdot S^{-3,492}$

Особенно температуру. заметно влияние наноматериалов. Как видно из результатов численного моделирования и натурного эксперимента введение в ТСМ незначительного количества нанопорошка меди позволяет существенным образом снизить  $T_{\kappa}$ . Однако для более установления общих закономерностей влияния наноприсадок высокодисперсных

высокодисперсных наполнителей на функциональные действия ТСМ требуется проведение

дополнительных исследований с использованием более широкого спектра наноматериалов и высокодисперсных материалов. Выявлено, что во всем принятом в работе диапазоне варьирования параметрами процесса шлифования наибольшее снижение шероховатости шлифованных поверхностей наблюдается при применении состава Г2 (рис. 5,б).

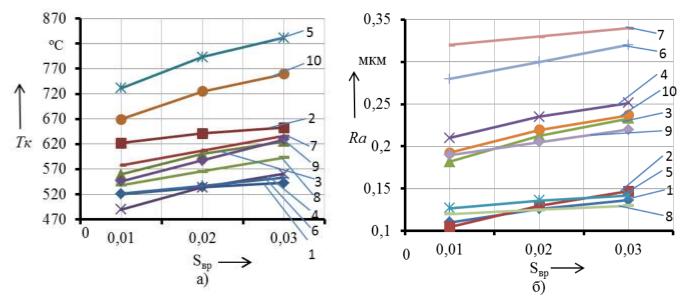
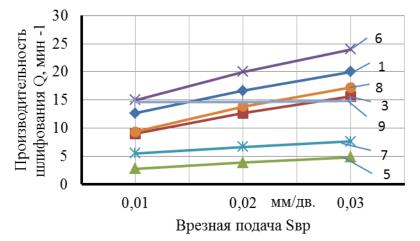


Рис. 5. Зависимость средней контактной температуры  $T_{\kappa}$  (а) и параметра шероховатости Ra (б) от врезной подачи  $S_{\rm Bp}$ : круг - 1 300` 40` 76` 25A F60 M 5 V A;  $V_{\it cm}$  = 15 м/мин; 1 – 10 – номера ТСМ по табл. 1

По данным результатов исследований теплосиловой напряженности была проведена оценка производительности процесса плоского шлифования с применением ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками.

По результатам оценки производительности (рис. 6) шлифования с применением исследуемых ТСМ было установлено, что высокодисперсные наполнители и антифрикционные наноприсадки существенным образом влияют на производительность шлифования. Например, введение в состав Г2 наноприсадки меди приводит к увеличению производительности до 15 %, а наноприсадки алюминия к уменьшению производительности до 60 %. Наибольшее увеличение производительности отмечено при применении состава Г2М5.



**TCM** 6. Влияние Рис. c высокодисперсными наполнителями И антифрикционными наноприсадками на производительность плоского шлифования периферией круга: 3 - 9 – составы ТСМ по табл. 1;  $V_{cm} = 15$  м/мин;  $T_{\kappa} = 400$  °C; круг – 25A F60 M 5 V A

**В четвертой главе** приведены результаты опытно-промышленных испытаний ТСМ в ООО «НПО Димитровградский инструментальный завод» (г. Димитровград), ООО «Сервис-Газ» (г. Ульяновск), ООО «Автопромэко» (г. Ульяновск) на операциях заточки РИ из сталей Р6М5 и шлифования заготовок матриц прессформ и пуансонов из стали X12М. Испытания, проведенные в ООО «Сервис-Газ» на операции заточки торцовых фрез из быстрорежущей

стали P6M5, показали, что период стойкости ШК при применении ТСМ на этой операции на 10 % превышал этот показатель при применении базового состава М1. Приведен расчет совокупного ожидаемого годового экономического эффекта от использования ТСМ на примере их применения в ООО «Сервис-Газ». В последнем случае ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новых ТСМ на операции заточки фрез из быстрорежущей стали P6M5 составил 312 тысяч рублей.

Разработаны технологические рекомендации по применению TCM на операциях плоского шлифования заготовок деталей машин и заточки PИ, в том числе даны рекомендации по выбору состава TCM в зависимости от режима шлифования и характеристики ШК.

Приведены технологические регламенты по безопасному применению TCM на операциях шлифования, в том числе требования по промышленной, пожарной и экологической безопасности.

Представлены конструкции устройств, обеспечивающие автоматизированную подачу ТСМ на рабочую поверхность ШК, как в твердом, так и жидком агрегатном состояниях.

Рассмотрены перспективы повышения эффективности применения ТСМ, в частности, путем создания на рабочей поверхности ШК многослойных смазочных покрытий из ТСМ. По результатам теоретико-экспериментальных исследований на основе разработанных составов ТСМ изготовлены и реализованы на машиностроительных предприятиях г. Ульяновска и Ульяновской области опытные партии карандашей ТСМ объемом партий в среднем 30 – 50 шт. Средняя стоимость поставляемых КТС в ценах 2015 г. составляла 50 руб. / шт. при себестоимости 25 руб. / шт. Результаты выполненных работ имеют хорошие перспективы для коммерциализации путем организации промышленного производства.

Результаты теоретико-экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс подготовки студентов машиностроительного факультета УлГТУ, обучающихся по магистерской программе «Технология машиностроения» направления 15.04.05 — «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- 1. Доказана эффективность применения TCM с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками, на операциях плоского шлифования заготовок деталей машин и заточке РИ.
- 2. Разработана теплофизическая модель плоского шлифования периферией ШК с применением ТСМ, позволяющая рассчитать среднюю контактную температуру для широкого диапазона условий.
- 3. Разработана математическая модель высотных параметров шероховатости поверхностей заготовок деталей, шлифованных с применением ТСМ, учитывающая влияние расхода ТСМ на динамическую разновысотность *аз* на 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 предложенных компьютерной и математической моделей и регрессионных зависимостей в лабораторных и промышленных условиях при применении разработанных составов ТСМ.
- 6. Экспериментально установлено, что наибольшее снижение теплосиловой напряженности наблюдается при применении ТСМ с высокодисперсным наполнителем из голубой глины и наноприсадкой из порошка меди. Снижение средней контактной температуры составило 20 25 % по сравнению с базовыми составами ТСМ. Наибольшее снижение шероховатости 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 как в твердом, так и в жидком агрегатных состояниях.
- 8. На основе экспериментальных данных разработаны технологические рекомендации по применению ТСМ, позволяющие в зависимости от требуемых параметров качества изделия и производительности процесса шлифования выбрать состав ТСМ, а также спрогнозировать качество поверхностного слоя шлифованных поверхностей деталей.
- 9. Проведены опытно-промышленные испытания разработанных ТСМ в действующем производстве, которые показали, что применение ТСМ с высокодисперсными наполнителями и антифрикционными наноприсадками обеспечивает повышение производительности шлифования по сравнению с базовыми составами в 1,2 1.4 раза.
- 10. Результаты теоретико-экспериментальных исследований используются в учебном процессе подготовки студентов машиностроительного факультета УлГТУ, обучающихся по магистерской программе «Технология машиностроения» направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

# Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах: Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

- 1. 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,  $2016. \mathbb{N} 5 (184). \mathbb{C}.85 90.$
- 2. Веткасов Н.И. Расчет шероховатости поверхностей, шлифованных с применением твердых смазочных материалов / Н.И. Веткасов, А.В. Степанов.//Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2015. № 3-1 (33-1). С. 36 41.

## Патенты $P\Phi$ на изобретения и свидетельства $P\Phi$ о регистрации программ для ЭВМ

- 3. Патент № 2531587, РФ. МПК С10М125/00.Твердый смазочный материал для абразивной обработки/А.В. Степанов, Н.И. Веткасов, Е.А.Жегалов. Опубл. 20.10.2014. Бюл. №9.
- 4. Свидетельство № 2014614073 о государственной регистрации программы на ЭВМ. Конвертер данных./А.В. Степанов, Н.И. Веткасов.– № 2014616620, опубл.20.07.2014.
- 5. Свидетельство № 2014614080РФ о государственной регистрации программы на ЭВМ. Расчет шероховатости. /А.В. Степанов, Н.И. Веткасов.— Опубл.20.07.2014.
- 6. Свидетельство № 2015616818 РФ о государственной регистрации программы на ЭВМ. Расчет шероховатости. /А.В. Степанов, Н.И. Веткасов. Опубл. 20.07.2015.

### Публикации в других изданиях

- 7. Степанов А. В.Повышение качества поверхностного слоя шлифованных заготовок путем применения карандашей твердой смазки с наполнителями из ультрадисперсных природных и наноматериалов/А. В.Степанов, Н.И.Веткасов, В.В. Сапунов // Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: материалы IV МНПК. В 2-х частях. Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева. 2012. Ч.ІІ. С. 59 61
- 8. Сапунов В.В. Моделирование температурных полей в заготовке при плоском шлифовании периферией круга с применением карандашей твердой смазки /В. В. Сапунов, А. В. Степанов, Н. И. Веткасов// Современные наукоемкие технологии развития и подготовки кадров: сборник статей МНПК. Казань: Изд-во Казан.гос. техн. ун-та. 2014. С. 30 34
- 9. 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 IVмежд. студ. науч.-практ. конф. (Омск, 25-30 марта 2015 г.)/ Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 226 229 с.