

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

621.923

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ (ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТЫ)

Докторант, канд. техн. наук С. М. МИХАЙЛИН

На основе сопоставления результатов численного моделирования и экспериментального исследования теплонапряженности процесса плоского торцового шлифования стандартными и композиционными кругами показана адекватность разработанных математических моделей и программного обеспечения. Доказана возможность снижения теплонапряженности благодаря применению композиционных шлифовальных кругов. Предложены регрессионные математические модели средней контактной температуры.

On the basis of comparison results of a numerical modeling and experimental investigation of thermopressure process of flat grinding by standart and composition wheels it is shown the adequation of created mathematical models and programme software. The possibility of lowering thermopressure due to application of composition grinding wheels is shown. There are offered regressive mathematical models of medium contact temperature.

Представленное исследование предпринято с целью решения нескольких взаимосвязанных задач: 1) проверки адекватности разработанных математических моделей и расчетных методик численного моделирования теплового состояния заготовки и абразивного инструмента при шлифовании [1]; 2) сравнительной оценки теплонапряженности плоского торцового шлифования композиционными и стандартными абразивными кругами и выявления на этой основе возможности снижения контактной температуры при различных условиях обработки; 3) получения математических зависимостей экспериментального значения контактной температуры от скорости продольного перемещения стола станка $v_{ст}$, величины врезной подачи $S'_в$, угла наклона шлифовального круга к обрабатываемой поверхности заготовки α и числа пазов (прорезей) в композиционном шлифовальном круге Z_n [2, 3], что послужит основой для разработки соответствующих технологических регламентов. При проведении натуральных экспериментов первую и вторую задачи решали однофакторным планом, а для решения третьей задачи реализовали полный факторный эксперимент 2^4 .

Теплонапряженность плоского торцового шлифования оценивали по средней контактной температуре в зоне шлифования T , которую измеряли путем шлифования полусинтетической термодатчи «материал обрабатываемой заготовки — константан». ТермоЭДС, возникающая в процессе шлифования между термоэлектродом и заготовкой, в виде электрического сигнала поступала на один из каналов аналого-цифрового преобразователя, с которого сигнал поступал на компьютер (рис. 1). При установленной частоте опроса термодатчика (2500 Гц при 256 уровнях квантования) в целях требуемого быстродействия использовали компьютер IBM PC 486. Сигнал записывался в оперативную память ПЭВМ и далее обрабатывался по программе *ТЕРМО.EXE*.

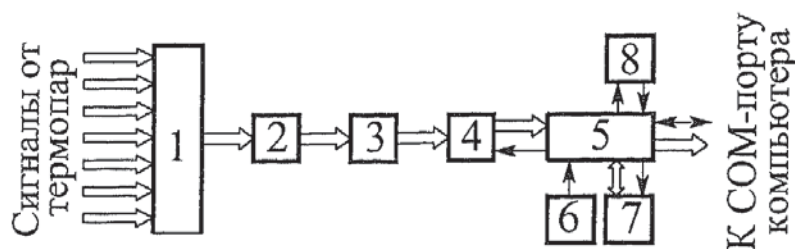


Рис. 1. Блок-схема системы сбора термоЭДС: 1 — коммутатор; 2 — прецизионный выпрямитель (инвертор отрицательного сигнала); 3 — прецизионный усилитель напряжения; 4 — восьмиразрядный аналого-цифровой преобразователь; 5 — процессор; 6 — тактовый генератор; 7 — буферная память; 8 — постоянное запоминающее устройство

Заготовки (образцы) размером $45 \times 15 \times 15$ мм из сталей 45 ($HRC 40 \dots 50$), ШХ15 ($HRC 58 \dots 62$) и Р6М5 ($HRC 63 \dots 65$) шлифовали на экспериментальной установке, созданной на основе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ. Использовали композиционные шлифовальные круги (КШК) с двенадцатью радиальными прорезями [2, 3] и стандартные круги (СК) того же типоразмера и характеристики — 1—250×25×76 25А25-ПСМ15Б6 на бакелитовой связке. Диапазон изменения числа пазов Z_n от 0 до 12 задан из условия постановки полного факторного эксперимента и возможности высокопроизводительного изготовления КШК методом прессования. В качестве твердого смазочного материала (ТСМ) при изготовлении КШК использовали композицию, обеспечивающую достаточно высокую прочность смазочных элементов и отсутствие прижогов на шлифуемых поверхностях: графит ГЛ1 — 70 % по массе, пульвербакелит СФП-012А — 29 %, декстрин — 1 %.

Рабочая скорость шлифовального круга (ШК) v_k равнялась 35 м/с (по периферии). Скоростью продольного перемещения стола $v_{ст}$, величину врезной подачи S_v и угол наклона ШК к обрабатываемой поверхности α варьировали на двух уровнях: $v_{ст} = 0,08$ и $0,3$ м/с, $S_v = 0,005$ и $0,01$ мм/дв. ход, $\alpha = 0$ и 5° ; снимаемый припуск — 0,4 мм. Элементы режима шлифования были установлены по результатам предварительных опытов, а также с учетом технологических возможностей станка и рекомендаций [4].

ШК правили методом точения, используя в качестве правящего инструмента алмазный карандаш 3908-0083. Режим правки: 3 прохода со съемом 0,02 мм/дв. ход; 3 прохода без подачи; скорость продольной подачи 0,003 м/с. Указанный режим правки обеспечивает полное восстановление режущей способности ШК.

Обработку результатов экспериментов выполняли по РДМУ 109-77 [5] на ПЭВМ IBM Pentium III — 800. Число параллельных опытов, рассчитанное по результатам предварительных экспериментов, равно 5. Гипотезу однородности дисперсий принимали, если расчетное значение критерия Кохрена оказывалось меньше табличного, а гипотезу адекватности итоговой зависимости реальному процессу шлифования, если расчетное значение критерия Фишера оказывалось меньше его табличного значения.

Установлено, что максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями средней контактной температуры T при шлифовании заготовок из сталей Р6М5, 45 и ШХ15 стандартным кругом составляет 5; 8,1 и 11,3 % (табл. 1), композиционным кругом — 4,1; 9,1 и 9,5 % соответственно (табл. 2). При обработке заготовок из стали Р6М5 расхождение вдвое меньше, чем при обработке заготовок из сталей 45 и ШХ15. Среднее расхождение расчетных и экспериментальных значений контактных температур при шлифовании стандартным и композиционным кругом для всего исследованного диапазона условий и элементов режима обработки составляет 4,1 и 5,1 % соответственно, что

свидетельствует об адекватности математических моделей и методик [1], использованных для теплофизического анализа плоского торцового шлифования, реальному процессу.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения средней контактной температуры T при плоском шлифовании стандартным кругом 1 — 250×25×76 25A25-ПСМ15Б6

№	Элементы режима шлифования		α , град.	Сталь	Температура T , К	Расхождение ΔT , %
	$S_{\text{в}}$, мм/дв. ход	$v_{\text{ст}}$, м/с				
1	0,005	0,08	0	P6M5	639/618	-3,3
				45	532/523	-1,7
				ШХ15	510/558	+9,4
2	0,01	0,08	0	P6M5	655/647	-1,2
				45	631/598	-5,2
				ШХ15	713/702	-1,5
3	0,005	0,3	0	P6M5	645/660	+2,3
				45	603/554	-8,1
				ШХ15	657/671	+2,1
4	0,01	0,3	0	P6M5	691/691	0
				45	653/623	-4,5
				ШХ15	761/789	+3,6
5	0,005	0,08	5	P6M5	609/590	+3,1
				45	463/479	-3,3
				ШХ15	480/511	+6,4
6	0,01	0,08	5	P6M5	621/609	-2
				45	538/507	-5,7
				ШХ15	616/638	+3,5
7	0,005	0,3	5	P6M5	608/618	+1,6
				45	503/471	-6,3
				ШХ15	607/676	+11,3
8	0,01	0,3	5	P6M5	683/649	-5
				45	563/574	+1,9
				ШХ15	728/693	-4,8

Примечания: 1. В числителе – экспериментальное, в знаменателе – расчетное значение температуры T .

2. При расчете «расхождения» за 100 % принята экспериментальная температура.

Использование композиционного ШК позволяет заметно снизить контактную температуру по сравнению с шлифованием стандартным кругом, о чем свидетельствуют результаты натуральных экспериментов (рис. 2) и расчета температур (рис. 3): расчетные значения температур при шлифовании КШК оказались ниже, чем при шлифовании стандартным кругом заготовок из сталей P6M5, 45 и ШХ15 в среднем на 14,9; 14,2 и 6,7 %, а экспериментальные — на 13; 14,5 и 5 % соответственно.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения средней контактной температуры T при плоском шлифовании композиционным кругом 1 — 250×25×76 25A25-ПСМ15Б6

№	Элементы режима шлифования		α , град	Сталь	Температура T , К	Расхождение ΔT , %
	S_n , мм/дв. ход	$v_{ст}$, м/с				
1	0,005	0,08	0	P6M5	511/499	-2,4
				45	420/447	+6,4
				ШХ15	501/542	+8,1
2	0,01	0,08	0	P6M5	587/579	-1,3
				45	551/508	-7,8
				ШХ15	657/663	+0,9
3	0,005	0,3	0	P6M5	585/562	-4
				45	510/486	-4,7
				ШХ15	618/569	-7,9
4	0,01	0,3	0	P6M5	618/621	+0,4
				45	597/547	-8,3
				ШХ15	730/703	-3,6
5	0,005	0,08	5	P6M5	483/464	-4
				45	373/398	+6,7
				ШХ15	470/498	+5,9
6	0,01	0,08	5	P6M5	553/531	-4,1
				45	444/404	-9,1
				ШХ15	586/566	-3,4
7	0,005	0,3	5	P6M5	551/573	+3,8
				45	437/453	+3,5
				ШХ15	557/610	+9,5
8	0,01	0,3	5	P6M5	589/602	+2,1
				45	485/493	+1,6
				ШХ15	669/636	-4,9

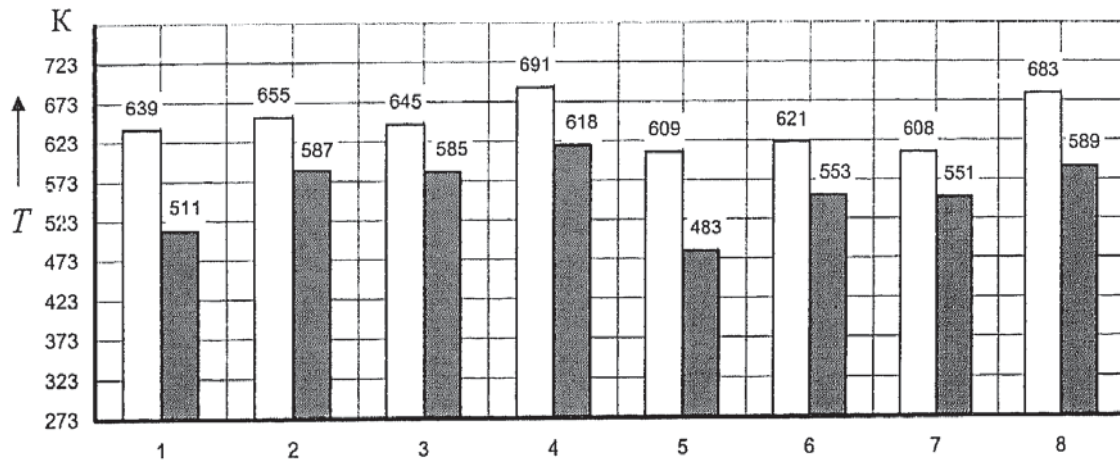
Примечания: 1. В числителе – экспериментальное, в знаменателе – расчетное значение температуры T .
2. При расчете «расхождения» за 100 % принята экспериментальная температура.

Математические модели, описывающие зависимость экспериментальных значений средней контактной температуры T от элементов режима шлифования ($v_{ст}$ и S_n), угла наклона шлифовального круга α и числа пазов КШК Z_n при шлифовании заготовок из сталей P6M5 (1), 45 (2) и ШХ15 (3) имеют следующий вид:

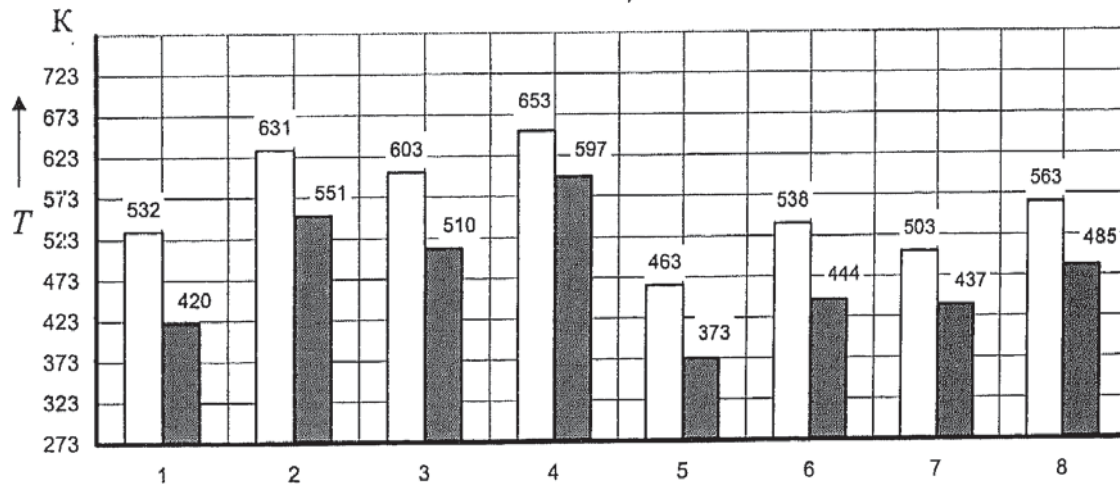
$$T = 569,4 + 4502S_n + 1,83v_{ст} - 4,56 Z_n ; \quad (1)$$

$$T = 463,8 + 8572,9S_n + 3,3v_{ст} - 6,5\alpha - 3,97Z_n ; \quad (2)$$

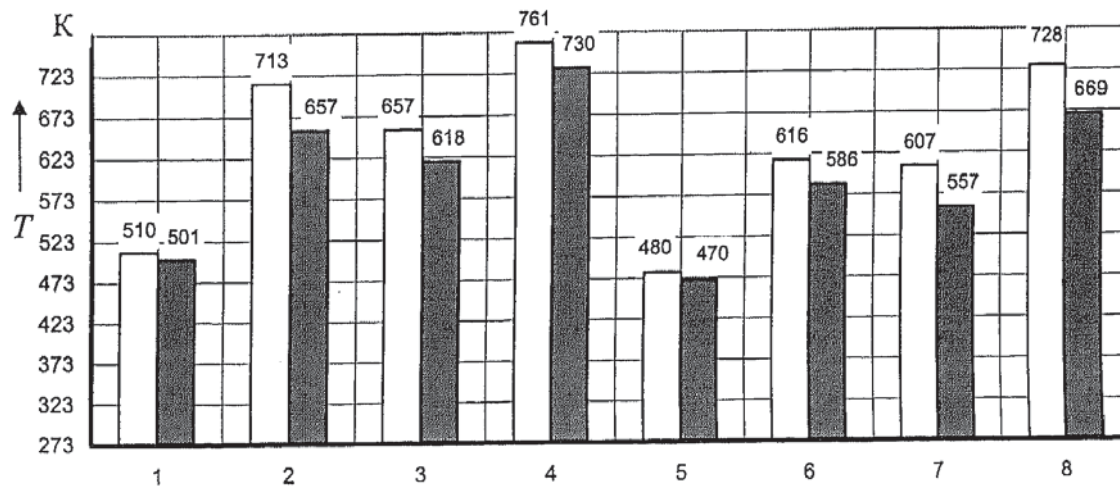
$$T = 520,3 + 14241,7S_n + 5,96V_{ст} - 3,64\alpha \quad (3)$$



а)



б)



в)

Рис. 2. Экспериментальные значения средней контактной температуры T при плоском шлифовании стандартным и композиционным кругами 1 — $250 \times 25 \times 76$ 25A25-ПСМ15Б6: а, б, в — материал заготовок — сталь Р6М5, 45, ШХ15 соответственно; $v_k = 35$ м/с; 1–8 — режимы шлифования по табл. 1 и 2. □ — стандартный круг; ■ — композиционный круг

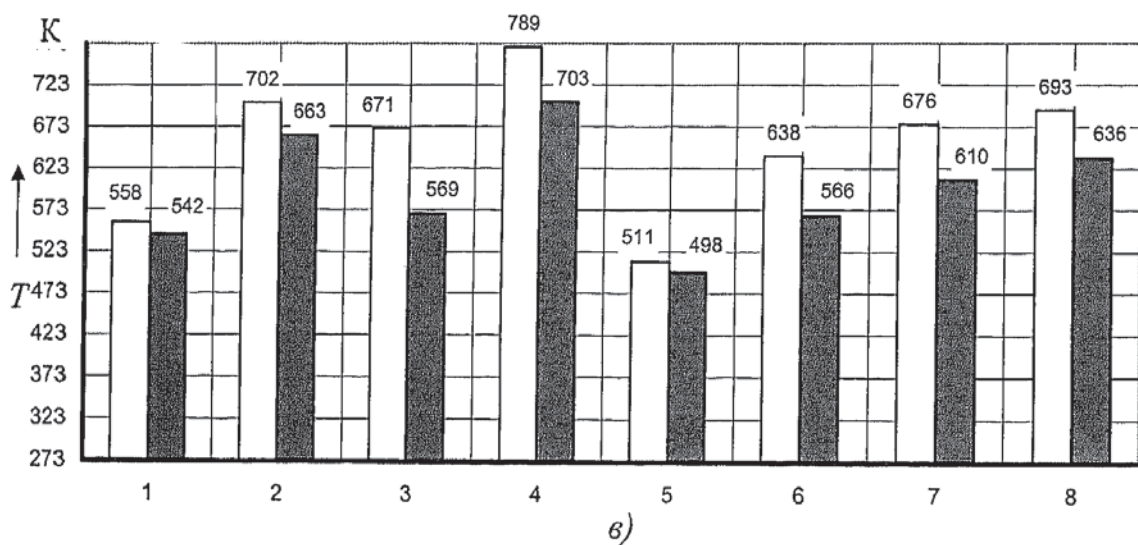
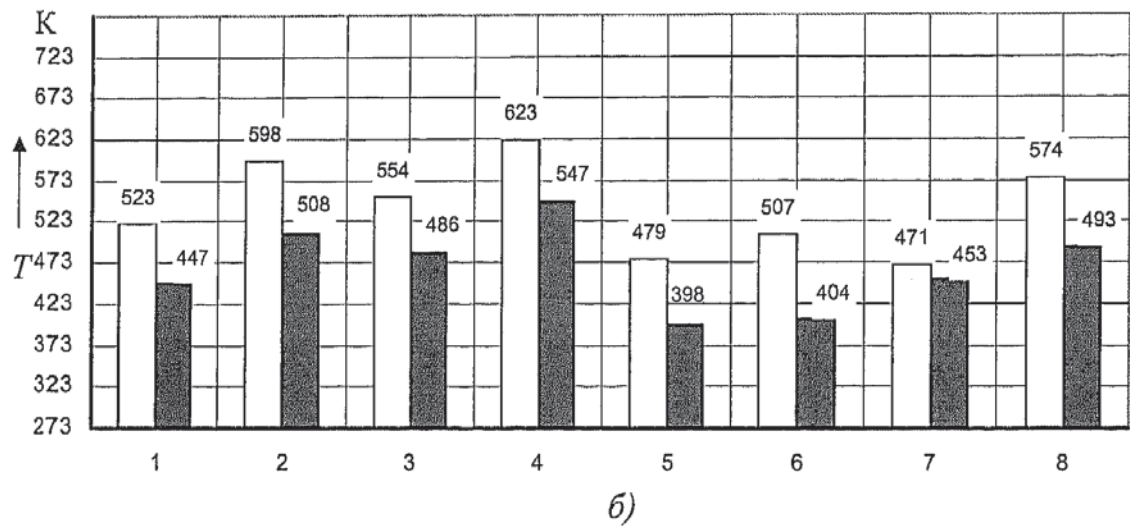
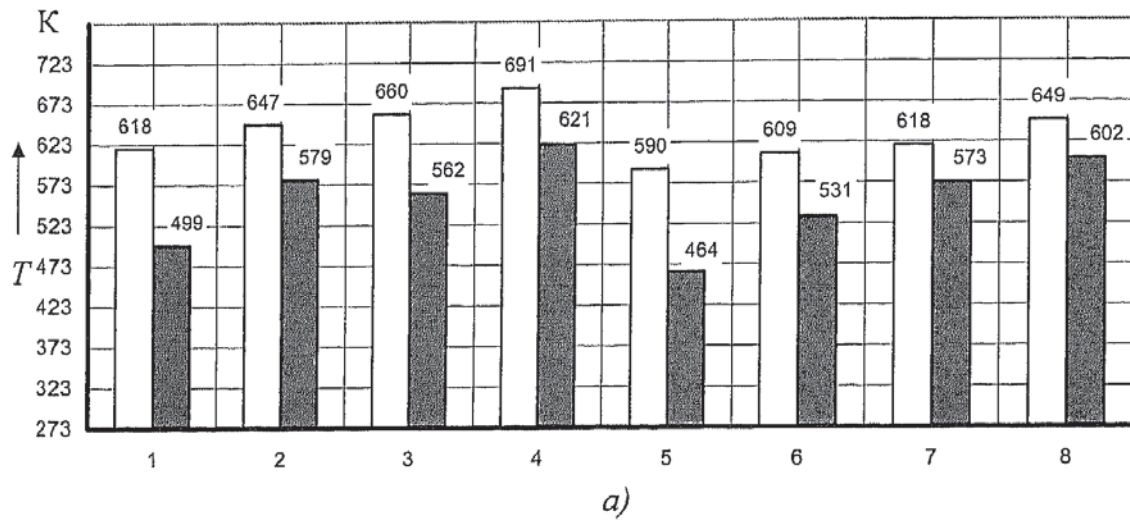


Рис. 3. Расчётные значения средней контактной температуры T при плоском шлифовании стандартным и композиционным кругами: 1 — $250 \times 25 \times 76$ 25A25-ПСМ15Б6; условия численного моделирования — см. в подписи к рис. 2

На основном уровне входных параметров ($S_b = 0,0075$ мм/дв. ход, $v_{ст} = 10$ м/мин, $\alpha = 2,5^\circ$, $Z_n = 6$) температура заготовок из сталей Р6М5, 45 и ШХ15 составляет 569,4; 463,8 и 520,3 К соответственно, т. е. обратно пропорциональна значениям коэффициентов теплопроводности этих сталей. При варьировании элементами режима шлифования S_b и $v_{ст}$ температура изменяется в большей степени при шлифовании заготовок из стали ШХ15, и в меньшей — из стали Р6М5, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты регрессии при этих параметрах: 14241,7 и 5,96 — для стали ШХ15 и 4502 и 1,83 — для стали Р6М5. Более заметное увеличение T с увеличением S_b и $v_{ст}$ при обработке заготовок из стали ШХ15 объясняется закономерностью изменения коэффициента теплопроводности стали Р6М5 в зависимости от температуры: при 500 К эти коэффициенты для сталей Р6М5 и ШХ15 одинаковы, а при более высокой температуре коэффициент теплопроводности стали Р6М5 больше, чем стали ШХ15; при шлифовании на менее производительном режиме ($S_b = 0,005$ мм/дв. ход и (или) $v_{ст} = 0,08$ м/с) контактная температура при шлифовании заготовок из стали ШХ15 ниже, чем при шлифовании заготовок из стали Р6М5, так как при малых температурах коэффициент теплопроводности стали ШХ15 выше его значения для стали Р6М5.

Коэффициент уравнения регрессии при параметре α является незначимым для заготовок из стали Р6М5 — зависимость (1) и значимым для двух других сталей — зависимости (2) и (3). Для заготовок из стали 45 этот коэффициент больше, чем для заготовок из стали ШХ15, вследствие чего угол наклона круга относительно обрабатываемой поверхности заготовки оказывает более существенное влияние на контактную температуру при шлифовании заготовок из стали 45.

Коэффициенты уравнений регрессии при параметре Z_n оказались значимыми при шлифовании заготовок из сталей Р6М5 и 45 — зависимости (1) и (2), что свидетельствует о весомом влиянии числа пазов в КШК на температуру при шлифовании заготовок из этих сталей. Для заготовок из стали ШХ15 этот коэффициент незначим.

Все коэффициенты уравнений при взаимодействующих факторах являются незначимыми. Следовательно, влияние на контактную температуру каждого фактора несущественно различается при различных уровнях других факторов.

Полученные регрессионные модели позволяют прогнозировать значение средней контактной температуры T при шлифовании заготовок из испытанных материалов и значениях входных параметров из диапазона $S_b = 0,005 \dots 0,01$ мм/дв. ход, $v_{ст} = 0,08 \dots 0,3$ м/с, $\alpha = 0 \dots 5^\circ$, $Z_n = 0 \dots 12$. Если значения входных параметров выходят за рамки этих диапазонов или шлифуются заготовки из других материалов, следует использовать более трудоемкий аналитический метод расчета контактной температуры с помощью разработанных методик и программ [1].

В табл. 3 в качестве примера приведены результаты расчета с помощью регрессионных моделей средней контактной температуры при шлифовании стандартным ($Z_n = 0$) и композиционным ($Z_n = 6$) кругом при основном уровне входных параметров.

Выводы

Натурными экспериментами доказана адекватность ранее разработанных математических моделей и методики расчета контактной температуры [1] реальному процессу в широком диапазоне значений элементов режима и условий плоского торцового шлифования: результаты вычислительного и натурального эксперимента отличаются не более, чем на 11,3 % при обработке стандартным и на 9,5 % — композиционным кругом.

Таблица 3

Расчетные значения средней контактной температуры T , К, при плоском шлифовании стандартным ($Z_n = 0$) и композиционным ($Z_n = 6$) кругом ($S_n = 0,0075$ мм/дв. ход, $v_{ст} = 0,1$ м/с, $\alpha = 2,5^\circ$)

Материал заготовки – сталь	Шлифовальный круг		Расхождение значений температур
	стандартный	композиционный	
Р6М5	621,5	566,8	8,8
45	577,4	529,7	8,2

Примечание. При расчете T за 100 % принята температура при шлифовании стандартным кругом.

Установлено, что при шлифовании композиционным кругом расчетная и экспериментальная температуры снижаются по сравнению с шлифованием стандартным кругом на 6,7 ... 14,2 % и на 5 ... 13 % соответственно, причем в меньшей степени при обработке заготовок из стали ШХ15. Эффект снижения теплонапряженности благодаря применению КШК при шлифовании заготовок из стали Р6М5 более значим в диапазоне менее интенсивных режимов обработки, а при шлифовании заготовок из стали ШХ15, наоборот, при более интенсивных режимах.

Получены математические модели, описывающие зависимость экспериментальных значений средней контактной температуры от элементов режима шлифования S_n и $v_{ст}$, угла наклона α и числа пазов в КШК Z_n .

Таким образом, в результате выполненных исследований обеспечена возможность объективной оценки теплового состояния обрабатываемых заготовок и шлифовальных кругов, в том числе композиционных, на основе численного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальногов В. Н., Михайлин С. М. Теплофизический анализ как основа проектирования композиционных шлифовальных кругов // Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — № 3. — С. 53 — 64.
2. Худобин Л. В., Веткасов Н. И. Шлифование композиционными кругами. — Ульяновск: УлГТУ, 2004. — 256 с.
3. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Под общ. ред. Л. В. Худобина. — М.: Машиностроение, 2006. — 544 с.
4. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. Часть II. Нормативы режимов резания. — М.: Экономика, 1990. — 474 с.
5. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов: Методические указания. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 64 с.