

4. Филиппов, А.Ф. О распределении размеров частиц при дроблении. Теория вероятностей и ее применения, 6, №3 (1961), 299 – 318.
5. Ватугин, В.А., Дьяконова, Е.Е. Ветвящиеся процессы Гальтона-Ватсона в случайной среде. Теория вероятностей и ее применения, 48, №2 (2003), 274 – 300.
6. Нагаев, С.В. Ветвящиеся процессы. / math.nsc.ru/LBRT/g1/nagaev/res/R5Nagaev BranchingProcesses2008.pdf
7. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т.1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 528 с., ил.: Т.2, Мир, М., 1984, 752 с.
8. Харрис, Т. Теория ветвящихся случайных процессов. – М.: Мир, 1966. – 356 с., пер. с англ.: Т.Е. Harris, The theory of branching processes, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1963 Zbl 0117.13002.
9. Карлин, С. Основы теории случайных процессов. – М.: Мир, 1971 г. – 537 с., пер. с англ.

УДК 621.923

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ ЭЛЬБОРА С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

САРАЙНОВ Н.Е., магистрант, УНЯНИН А.Н., профессор

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск,  
Российская Федерация

Ключевые слова: шлифование, температура, ультразвуковые колебания.

Выбраны физические и математические модели для расчета температурного поля, приведены методика и результаты моделирования локальных температур при шлифовании кругами из эльбора с наложением ультразвуковых колебаний.

Повышение эффективности процесса шлифования с использованием энергии ультразвуковых колебаний (УЗК) во многом связано со снижением тепловой напряженности процесса. На работоспособность шлифовального круга и качество поверхностного слоя обработанной детали оказывают влияние, преимущественно, локальные температуры [1, 2]. Аналитическое исследование и численное моделирование температурного поля, в том числе локальных температур, при шлифовании с наложением УЗК выполнено применительно к шлифовальным кругам из электрокорунда [3]. Перспективным направлением повышения эффективности процесса шлифования является применение кругов из сверхтвердых абразивных материалов, в том числе эльборовых, поэтому исследование температурного поля при шлифовании этими кругами с наложением УЗК представляет актуальную задачу.

Физические и математические модели для расчета локальных температур [1, 3] учитывают теплообразование при работе отдельных абразивных зерен шлифовального круга, который представлен как стохастический многокомпонентный объект, включающий связку, поры и абразивные зерна. Приняты во внимание тепловыделения в зоне деформирования (плотность теплового потока  $q_0$  на рис. 1) и в зонах контакта абразивных зерен со стружкой ( $q_1$ ) и заготовкой ( $q_2$ ), взаимное перемещение контактирующих объектов, условия их охлаждения при подаче смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и наложение тепловых источников от отдельных зерен. Для повышения достоверности результатов учтены зависимости параметров, характеризующих сопротивление материала заготовки диспергированию, а также теплофизических свойств взаимодействующих объектов (в том числе внешней среды) от температуры. Модели учитывают изменение кинематики микрорезания абразивными зёрнами, механических характеристик материала заготовки и условий проникновения СОЖ в зону шлифования при наложении УЗК.

Моделирование температурного поля выполнено на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для каждого из взаимодействующих объектов, и учитывающих скорости их относительного перемещения (абразивных зерен относительно заготовки и стружки относительно зерен). Чтобы учесть формирование температурного поля как результат наложения тепловых импульсов от отдельных

абразивных зерен, моделировали поле от последовательно вступающих в контакт с заготовкой зерен.

Невозможность априорного определения плотностей распределения тепловых потоков между контактирующими объектами (зерном, заготовкой и стружкой), изменение положения зон контакта и размеров заготовки во времени, необходимость учета теплофизических свойств объектов и механических свойств заготовки от температуры ограничивает использование аналитических методов решения дифференциальных уравнений теплопроводности, поэтому уравнения решали численным методом. Разработаны методика, алгоритм и пакет программ численного решения задачи с применением метода конечных элементов. Адекватность физических и математических моделей, принятых при расчете, реальным условиям проверяли путем сравнения экспериментальных значений средней контактной температуры в зоне шлифования и локальной температуры с расчетными значениями.

Численное моделирование температур выполнено при следующих исходных данных: плоское многопроходное шлифование периферией круга; материал заготовки – коррозионностойкая сталь 12X18H10T; материал абразивного зерна шлифовального круга – эльбор марки ЛКВ зернистостью 125/100; рабочая скорость круга 35 и 70 м/с (скоростное шлифование); скорость продольной подачи 10 м/мин; глубина шлифования 0,01 мм. Моделировали наложение на заготовку УЗК частотой 22000 Гц с различной амплитудой  $A_y$  (в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности) и фазой  $\phi$ . Фиксировали локальные температуры в зоне контакта режущего зерна с заготовкой (участок  $EV$  на рис. 1) и в зоне контакта зерна со стружкой (участок  $EN$ ) при движении через зону шлифования первого из последовательно работающих абразивных зерен, т.е., когда диспергируется материал заготовки, не прогретый предыдущими зернами.

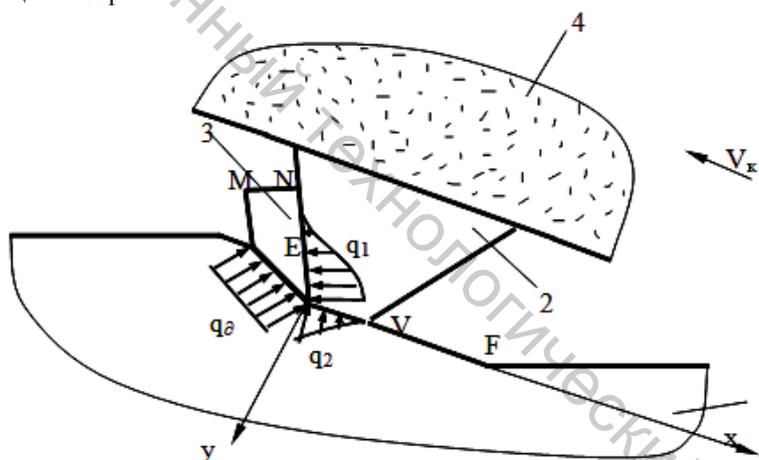


Рисунок 1 – Схема теплообмена в зоне контакта режущего зерна с заготовкой:  
1 – заготовка; 2 – абразивное зерно; 3 – стружка; 4 – шлифовальный круг

Из результата моделирования температур, представленного в таблице 1, следует, что с увеличением рабочей скорости шлифовального круга  $V_k$  вследствие увеличения мощности источников тепловыделения увеличиваются и локальные температуры. При шлифовании без наложения УЗК ( $A_y = 0$ ) с увеличением скорости до 70 м/с температура в зоне контакта зерна с заготовкой и со стружкой увеличивается на 13 и 26 % соответственно.

При наложении УЗК амплитудой  $A_y = 2$  мкм, не превышающей глубину внедрения зерна в заготовку  $a_{z1}$ , когда зерно не выходит из контакта с заготовкой, температуры оказались ниже, чем без наложения УЗК. При рабочей скорости шлифовального круга  $V_k = 35$  м/с локальные температуры в зоне контакта зерна с заготовкой и со стружкой ниже на 12 и 15 %; при рабочей скорости круга, равной 70 м/с – на 13 и 17 %. Следовательно, с увеличением скорости круга наложение УЗК обеспечивает снижение температуры в несколько большей степени. При

наложении УЗК амплитудой 3 мкм, превышающей глубину внедрения зерна в заготовку  $a_{z1}$  (рисунок 1), когда зерно выходит из контакта с заготовкой на участке  $l_{вн1} - l_{вк1}$  при фазе колебаний  $\varphi = 0^\circ$  и на участке  $l_{вн2} - l_{вк2}$  при фазе колебаний  $\varphi = 90^\circ$ , температуры снизились почти в 2 раза (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты расчета локальных температур

Амплитуда УЗК $A_y$ , мкм	Средняя локальная температура, К	
	на площадке контакта зерна с заготовкой	на площадке контакта зерна со стружкой
0	1001 / 1287	1212 / 1525
2	877 / 1126	1025 / 1262
3	558	633

В числителе приведены значения при  $V_k = 35$  м/с, в знаменателе – при  $V_k = 70$  м/с

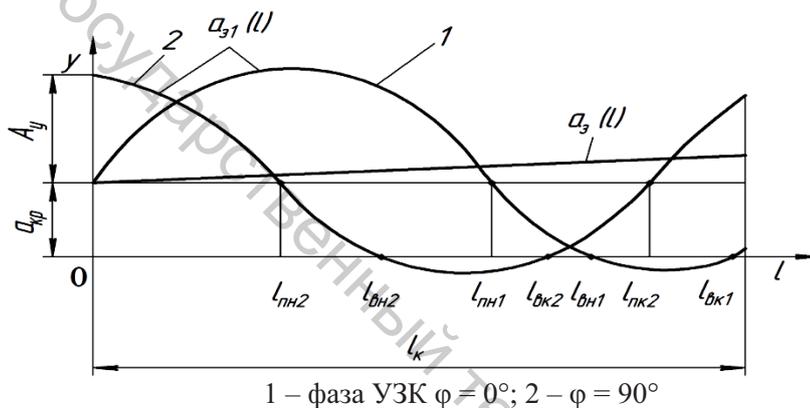


Рисунок 2 – Траектории движения зерна при различных фазах УЗК:

В результате установлено, что при увеличении рабочей скорости шлифовального круга в 2 раза локальные температуры увеличиваются на 13 ... 26 %. Выявлено, что при шлифовании с УЗК амплитудой, равной 3 мкм локальные температуры уменьшаются почти в два раза.

Литература:

1. Худобин Л. В. Влияние локальных температур на налипание материала заготовки на абразивные зерна / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин // СТИН. – 2008. – № 6. – С. 26 – 31.
2. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. Унянин А. Н. Исследование температур при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2 (32 - 2). – С. 191 – 195.

УДК 685.54:519.34

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПЕКЕТА МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СОПУТСТВУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ КОСТЮМА ВОЕННОСЛУЖАЩИХ АРКТИКИ**

СЕЛИНА Н.Г., аспирант, РЕВА Д.В., аспирант, ОСИНА Т.М., доцент ПРОХОРОВ В.Т., профессор, КОРАБЛИНА С.Ю., доцент

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (ф) ДГТУ, г. Шахты, Российская Федерация

Ключевые слова: военнослужащие, Арктика, климатические условия, пакет материалов.