

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ТОЧЕНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ ВИБРАЦИЙ

© 2018

А.Н. Унянин, доктор технических наук, доцент
П.Р. Финагеев, аспирант

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: точение; точение с наложением вибраций; точение с наложением ультразвуковых колебаний; тепловые потоки; температурное поле.

Аннотация: Температура процесса резания оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности и работоспособность инструмента. Одним из средств повышения эффективности процесса резания является рациональное использование вибраций (колебаний), в том числе ультразвуковой частоты. Однако аналитические исследования температуры точения с наложением вибраций отсутствуют. Приняли, что суммарная мощность тепловыделения при точении равна сумме мощностей тепловыделения источников, возникающих как результат перехода в теплоту работы деформирования и работы сил трения на передней и задней поверхностях инструмента. Приведены математические зависимости для расчета составляющих суммарной мощности тепловыделения. Приняли во внимание, что напряжение текучести, определяющее силы резания и трения на контактных поверхностях резца, заготовки и стружки, зависит от температуры в области пластической деформации. Закон распределения плотности тепловыделения на плоскости сдвига приняли равномерным; на поверхности контакта стружки с передней поверхностью резца приняли комбинированный закон; на поверхности контакта резца с заготовкой – несимметричный нормальный. Дана зависимость для расчета глубины резания при наложении колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Теплообмен на границах объектов, контактирующих с технологической жидкостью или воздухом, задан в форме закона Ньютона – Рихмана. Уравнения теплопроводности контактирующих объектов решали совместно с общими граничными условиями в зоне контакта, используя метод конечных элементов. Методика расчета на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в оригинальных программах. Результаты расчета температур при точении без наложения колебаний сравнивали с результатами, полученными экспериментальным путем, при этом расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 10 %. Моделирование процесса точения с наложением ультразвуковых колебаний показало, что главная составляющая силы резания P_z снижается в среднем на 11 %, максимальная температура в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой – на 20 %, максимальная температура в зоне контакта передней поверхности резца со стружкой – на 26 %.

ВВЕДЕНИЕ

Температура зоны резания оказывает существенное влияние на работоспособность инструмента, качество обработанных поверхностей деталей и производительность обработки [1; 2]. Многие задачи, возникающие при проектировании технологических операций, не могут быть решены без знания температур на контактных поверхностях инструмента и в поверхностных слоях заготовки.

Тепловые процессы при резании, в том числе при точении, достаточно полно изучены [3; 4]. При аналитическом исследовании теплофизики процесса резания, исходя из принятого маршрута тепловых потоков [5], определяют соответствующие потоки в инструмент, стружку и заготовку, а затем составляют и решают уравнения теплопроводности для каждого объекта. Недостатком такого подхода является приближенный учет распределения тепловых потоков между объектами. Теплофизические характеристики материалов заготовки и инструмента, а также механические характеристики материала заготовки (пределы прочности и текучести) существенно зависят от температуры [6].

Для определения коэффициентов, характеризующих распределение тепловых потоков между контактирующими объектами, используют формулу Ф. Шаррона [7] и аналогичные зависимости. Однако значения теплофизических характеристик материалов, входящих в эти зависимости, не могут быть точно определены, по-

скольку до начала расчета не известна температура, от которой эти характеристики зависят. Поэтому перспективным является подход, при котором дифференциальные уравнения теплопроводности объектов решают совместно с общими граничными условиями в зоне контакта [8; 9].

Одним из средств повышения эффективности процессов механической обработки является использование энергии вибраций (колебаний), в том числе ультразвукового диапазона, которые изменяют многие параметры процесса, в том числе силы и температуры [10; 11]. Однако аналитическое исследование температур при точении с наложением вибраций не выполнено.

Для адекватной оценки температурного поля в процессе точения необходимы модели, учитывающие выделение теплоты в области стружкообразования и на поверхностях контакта резца с заготовкой и стружкой, взаимное перемещение контактирующих объектов (заготовки и стружки относительно резца), зависимость теплофизических характеристик материалов контактирующих объектов (режущей части инструмента и заготовки) и механических свойств материала заготовки от температуры, а также изменение глубины резания и механических характеристик материала заготовки при наложении колебаний.

Цель работы – исследование температурного поля при точении с наложением вибраций.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При теплофизическом анализе процесса точения полагают, что теплота выделяется в области стружкообразования (в плоскости сдвига) и на поверхностях контакта резца со стружкой и заготовкой [12] (рис. 1). В тепловую энергию преобразуется не вся работа пластического деформирования, а ее большая часть [13]. Однако при расчетах считают, что в тепловую энергию преобразуется вся работа деформирования [14]. Пластическая деформация материала заготовки осуществляется в объеме. В наших исследованиях приняты допущение, что источник тепловыделения, эквивалентный работе пластического деформирования, возникает в условной плоскости сдвига [12].

Общая мощность тепловыделения при точении равна сумме мощностей тепловыделения источников, возникающих в результате перехода в теплоту работы деформирования W_g и работы сил трения на передней W_{1T} и задней W_{2T} поверхностях резца.

Мощности источников тепловыделения можно опрелелить как [3; 12]:

$$W_{1T} = F_1 \cdot V_1; W_{2T} = F_2 \cdot V;$$

$$W_g = P_Z \cdot V - (W_{1T} + W_{2T}),$$

где F_1 и F_2 – силы трения на поверхности контакта резца со стружкой и заготовкой соответственно, Н;

V – скорость резания, м/с;

P_Z – главная составляющая силы резания, Н;

V_1 – скорость перемещения стружки относительно резца, м/с: $V_1 = V/k_c$, где k_c – коэффициент утолщения стружки.

Из работ [15; 16] следуют зависимости:

$$F_1 = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left(\mu + \frac{\mu_1 \cdot (1 - \text{tg} \gamma)}{\sin \gamma} \right);$$

$$F_2 = 1,155 \cdot \mu_2 \cdot \sigma_{St} \cdot l_2 \cdot \frac{t_r}{\sin \varphi},$$

где σ_{St} – среднее по области пластической деформации напряжение текучести обрабатываемого материала, соответствующее средней температуре в этой области, Па;

$S_{об}$ – подача на оборот заготовки, м/об;

t_r – глубина резания, м;

μ – коэффициент трения по напряжению текучести ($\mu=0,5$ и $\mu=0,3$ при отсутствии и наличии внешней среды (СОТС) в зоне обработки соответственно);

μ_1, μ_2 – коэффициенты трения стружки о переднюю поверхность резца и задней поверхности резца о заготовку;

γ – передний угол резца, град.;

φ – главный угол резца в плане, град.;

l_2 – длина контакта задней поверхности резца с заготовкой, м;

u – коэффициент: $u=1$ при $\gamma \geq 0$; $u=1 - \sin \gamma$ при $\gamma < 0$.

$$\sigma_{St} = \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}} \right),$$

где σ_s – напряжения текучести при температуре 20 °С, Па;

T_g – температура в области пластической деформации, °С;

$T_{пл}$ – температура плавления материала обрабатываемой заготовки, °С.

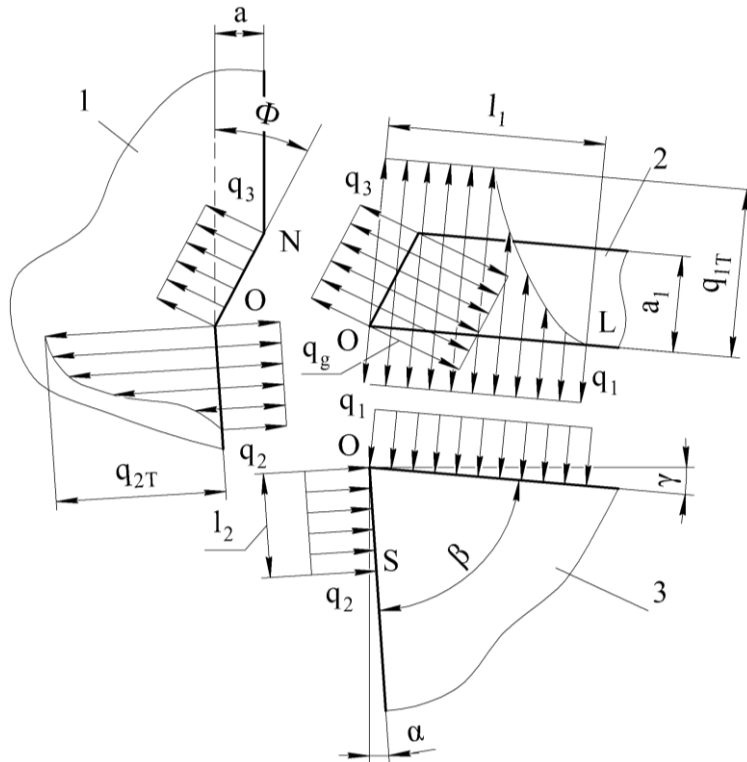


Рис. 1. Структурная схема теплообмена в зоне точения:
1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – резец

При работе резцом без площадки износа

$$l_2 = h_3 / \operatorname{tg} \alpha,$$

где h_3 – высота упругого поднятия материала заготовки в зоне задней поверхности резца, м;
 α – задний угол резца, град.

Параметр h_3 можно определить как [16]

$$h_3 = 1,155 \cdot \frac{\sigma_S}{E} \cdot h \times \left[\sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{k_C} - \mu \cdot \sin^2 \gamma \right],$$

где E – модуль упругости материала обрабатываемой заготовки, Па;

h – размер заготовки (при точении наружной цилиндрической поверхности $h = d/2$, где d – диаметр обрабатываемой поверхности, м).

При работе резцом с площадкой износа

$$l_2 = l_n + \frac{h_3}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где l_n – размер площадки износа, связанный с радиальным износом h_n зависимостью [17]

$$l_n = h_n \cdot [(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma) \cdot (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1) \cdot \sin \varphi],$$

где φ_1 – вспомогательный угол в плане, град.

Для расчета главной составляющей силы резания использовали зависимость [15; 16]

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_C} \right] \times \\ & \times \cos \gamma + \frac{k_C}{4 \cdot u \cdot \cos \gamma} + \mu \cdot \sin \gamma + \\ & + \frac{\mu_2 \cdot l_2}{u \cdot S_{об} \cdot \sin \varphi} + \frac{k_C \cdot S_{об} \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot u \cdot t_r \cdot \cos \gamma} \end{aligned} \right\}$$

Закон распределения плотности тепловыделения на плоскости сдвига приняли равномерным [12], поэтому зависимость для расчета плотности тепловыделения имеет вид

$$q_g = \frac{W_g \cdot \sin \varphi}{t_r \cdot S_{об}},$$

где φ – угол сдвига:

$$\sin \varphi = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{k_C^2 - 2 \cdot k_C \cdot \sin \gamma + 1}}.$$

При комбинированном законе распределения теплового источника в зоне контакта стружки с передней поверхностью резца плотность распределения можно определить как

$$q_{1T} = \frac{3 \cdot W_{1T} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot t_r \cdot l_1},$$

где l_1 – длина контакта стружки с резцом, которую можно рассчитать по зависимости [12]:

$$l_1 = t_r \cdot k_C^{0,1} \cdot [k_C \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{sec} \gamma].$$

При несимметричном нормальном распределении источника тепловыделения в зоне контакта резца с заготовкой максимальная плотность потока [12]

$$q_{2T} = \frac{2 \cdot W_{2T} \cdot \sqrt{k_0} \cdot \sin \varphi}{t_r \cdot \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{l_2 \cdot \sqrt{k_0}}{l_2^2} \right]},$$

где $k_0 = \frac{3}{l_2^2}$ – коэффициент; erf – функция [12].

При наложении синусоидальных колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности заготовки, глубина резания изменяется по закону

$$t_r^1 = t_r + A_y \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \tau + \varphi_k),$$

где A_y – амплитуда колебания в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, м;

f – частота ультразвуковых колебаний (УЗК), Гц;

φ_k – начальная фаза колебаний, рад.;

τ – время контакта резца с заготовкой, с.

Наложение колебаний приводит к качественному изменению процесса диспергирования материала заготовки и уменьшению его пределов прочности и текучести [18]. При наложении УЗК напряжение текучести материала заготовки

$$\sigma_{St}^1 = \sigma_{St} \cdot k_T,$$

где k_T – коэффициент, показывающий степень уменьшения напряжения текучести при наложении колебаний [18].

По данным [18] при амплитуде колебаний A_y от 5 мкм коэффициенты трения в зоне контакта инструмента с заготовкой уменьшаются до 1,5 раз.

Дифференциальные уравнения теплопроводности резца, заготовки и стружки решали совместно с общими граничными условиями в зоне контакта, что позволяло учесть распределение тепловых потоков между этими объектами [8; 9]. Теплообмен на границах объектов, контактирующих с технологической жидкостью или воздухом, задан в форме закона Ньютона – Рихмана, описывающего процесс конвективного теплообмена [12].

Необходимость совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, взаимное перемещение контактирующих объектов, необходимость учета зависимости теплофизических свойств контактирующих объектов и предела текучести материала заготовки от температуры, изменение глубины резания при наложении колебаний создают непреодолимые трудности аналитического решения уравнений теплопроводности. Задачу решали, используя численный метод

конечных элементов. При построении дискретных аналогов дифференциальных уравнений теплопроводности использовали универсальный метод баланса [19]. Методика расчета на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в оригинальных программах.

Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитать температуру в различных точках объектов (узлах сетки) через интервал времени, определенный исходя из устойчивости шага интегрирования по времени [19].

Программа написана на языке программирования Basic. Перед началом расчета вводятся исходные данные: размеры заготовки; размеры и геометрические параметры резца (передний угол γ , задний угол α , главный угол в плане ϕ и др.); элементы режима точения (скорость резания V , подача $S_{об}$, глубина резания t_r); коэффициенты трения μ , μ_1 и μ_2 ; теплофизические параметры материалов резца, заготовки, воздуха и СОТС в зависимости от температуры (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность); напряжения текучести материала заготовки в зависимости от температуры; амплитуда, частота и фаза накладываемых колебаний; параметры расчетной сетки. Программа строит расчетную сетку, рассчитывает устойчивые шаги по времени, силы резания и трения, плотности источников тепловыделения и температуры в различных точках контактирующих объектов. Температура, зафиксированная в данный момент времени, используется для расчета теплофизических характеристик объектов и напряжения текучести материала заготовки в последующий момент времени.

Фиксировали температуры в точках, расположенных на площадках контакта передней поверхности резца со стружкой и его задней поверхности с заготовкой, а так-

же температуру заготовки на различном расстоянии от обрабатываемой поверхности.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Численное моделирование температурного поля без наложения колебаний выполнили при следующих исходных данных: материал заготовки – сталь 40Х; материал режущей части резца – твердый сплав марки Т15К6; углы инструмента $\gamma=-4^\circ$, $\phi=45^\circ$; скорость резания $V=50, 100, 150$ и 200 м/мин; подача $S_{об}=0,21$ мм/об; глубина резания $t_r=1$ мм; $\mu_1=\mu_2=0,3$. Механические и теплофизические характеристики материала заготовки и резца (напряжение текучести σ_s , плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) в зависимости от температуры определяли по данным [6; 20].

Результаты расчета температур при точении без наложения колебаний сравнивали с экспериментальными результатами, приведенными в [21]. Расхождение значений не превышает 10 % (таблица 1), что свидетельствует об адекватности разработанной методики.

Численное моделирование температурного поля при наложении колебаний выполнили при следующих исходных данных: диаметр заготовки – 30 мм; материал заготовки – сталь 45; материал режущей части резца – твердый сплав марки Т15К6; углы инструмента $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$; скорость резания $V=2$ и 3 м/с; скорость подачи $S_{об}=0,1$ и $0,3$ м/мин; глубина резания $t_r=0,5$ и 1 мм; $\mu_1=\mu_2=0,3$ [3; 12].

Моделировали наложение УЗК амплитудой $A_y=5$ мкм и частотой $f=22000$ Гц в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности заготовки (таблица 2).

При моделировании процесса точения с наложением колебаний зафиксировано меньшее значение сил

Таблица 1. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента

Скорость резания V , м/мин	Температура резания расчетная T , °С	Температура резания экспериментальная T_s , °С	Расхождение расчетной и экспериментальной температур δ , %
50	755	750	0,7
100	961	880	8,4
150	992	980	1,2
200	1086	1060	2,4

Таблица 2. Результаты численного моделирования сил и температур при точении

Скорость резания V , м/мин	Подача $S_{об}$, мм/об	Глубина резания t_r , мм	Температура на передней поверхности T_1 , °С	Температура на задней поверхности T_2 , °С	Тангенциальная составляющая силы резания P_z , Н
120	0,1	0,5	404 / 256	351 / 257	30,9 / 27,4
	0,3		796 / 460	486 / 388	79,7 / 71,6
180	0,1		493 / 432	481 / 425	30,8 / 28,6
	0,3		826 / 644	633 / 447	79,3 / 72,2
120	0,1	1,0	475 / 414	425 / 378	75,2 / 66,8
	0,3		784 / 456	460 / 411	169,0 / 142,1
180	0,1		612 / 525	508 / 473	74,8 / 68,2
	0,3		831 / 640	739 / 444	167,1 / 141,2

Примечание: В числителе приведены значения сил и температур при точении без наложения колебаний, в знаменателе – с наложением колебаний.

и температур. Составляющая P_z силы резания снизилась в среднем на 11 %, максимальная температура в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой – на 20 %, в зоне контакта передней поверхности резца со стружкой – на 26 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработаны математические модели и программное обеспечение для расчета контактных температур точения, в том числе и с наложением колебаний. Модели учитывают зависимость теплофизических характеристик материалов контактирующих объектов и механических свойств материала заготовки от температуры, взаимное перемещение объектов, а также изменение глубины резания и механических характеристик материала заготовки при наложении колебаний.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений температур не превышает 10 %, что свидетельствует об адекватности разработанной методики.

Использование УЗК способствует уменьшению сил и температур. Сила P_z снизилась в среднем на 11 %, максимальная температура в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой – на 20 %, максимальная температура в зоне контакта передней поверхности резца со стружкой – на 26 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-47-730005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петраков Ю.В., Драчев О.И. Моделирование процессов резания. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 240 с.
- Железнов Г.С., Схиртладзе А.Г. Процессы механической и физико-химической обработки материалов. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 456 с.
- Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 287 с.
- Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2. P. 382–393.
- Воронцов А.Л. Исходные положения и критические замечания о современных методах теоретического исследования теплофизических процессов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № S3. С. 2–8.
- Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. 2-е изд., доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
- Воронцов А.Л. Определение температурных полей и контактных температур при резании. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № S8. С. 9–15.
- Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломасопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.
- Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 10–11.
- Nath C., Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting // International Journal of

Machine Tools and Manufacture. 2008. Vol. 48. № 9. P. 965–974.

- Унянин А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 229–235.
- Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
- Воронцов А.Л. Основные физико-математические положения новой теории. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № S7. С. 14–23.
- Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
- Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 9. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–76.
- Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 7. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.
- Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание, 2006. 512 с.
- Вологин М.Ф., Калашников В.В., Нерубай М.С., Штриков Б.Л. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
- Колдаев В.Д. Численные методы и программирование. М.: ИНФРА-М, 2009. 544 с.
- Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
- Воронцов А.Л. Практические расчеты температуры резания. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № S2. С. 14–23.

REFERENCES

- Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Modelirovanie protsessov rezaniya* [Modeling of Cutting Processes]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2011. 240 p.
- Zheleznov G.S., Skhirtladze A.G. *Protsessy mekhanicheskoy i fiziko-khimicheskoy obrabotki materialov* [The processes of mechanical and physicochemical treatment of materials]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2011. 456 p.
- Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 287 p.
- Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2, pp. 382–393.
- Vorontsov A.L. Starting positions and critical remarks about modern methods of theoretical research of

- thermophysics processes. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. S3, pp. 2–8.
6. Zubchenko A.S., ed. *Marochnik staley i splavov* [Grading of steels and alloys]. 2nd izd., dop. i ispr. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
 7. Vorontsov A.L. Definition of temperature fields and contact temperatures at cutting Part 1. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. S8, pp. 9–15.
 8. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomasopoverenosa* [Mechanical processing of blank parts in the circumstances of critical heat and mass transfer]. Moscow, RAN Publ., 2008. 250 p.
 9. Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, pp. 10–11.
 10. Nath C., Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, no. 9, pp. 965–974.
 11. Unyanin A.N. Analytical research on the temperature field at milling with ultrasonic oscillations superposition. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Soloveva*, 2017, no. 2, pp. 229–235.
 12. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p.
 13. Vorontsov A.L. The basic physical and mathematical positions of new theory Part 1. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. S7, pp. 14–23.
 14. Talantov N.V. *Fizicheskie osnovy protsessa rezaniya, iznashivaniya i razrusheniya instrumenta* [The physical basis of the cutting process of wear and destruction of the tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 240 p.
 15. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 9. Practical calculations of cutting parameters in turning. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 9, pp. 878–888.
 16. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 7. Mathematical description of the formation of different chips, pulsation of the cutting force, and contact parameters of the machined billet surface and the rear cutter surface. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 7, pp. 674–680.
 17. Yashcheritsyn P.I., Feldshteyn E.E., Kornievich M.A. *Teoriya rezaniya* [Cutting theory]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2006. 512 p.
 18. Vologin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubay M.S., Shtrikov B.L. *Primenenie ultrazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke* [Application of ultrasonic vibrations and explosion when processing and assembling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p.
 19. Koldaev V.D. *Chislennyye metody i programmirovaniye* [Numerical methods and programming]. Moscow, INFRA-M Publ., 2009. 544 p.
 20. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezaniye materialov: Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Metal cutting. Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2001. 448 p.
 21. Vorontsov A.L. Practical calculations of temperature of cutting Part 1. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2017, no. S2, pp. 14–23.

**THE RESEARCH OF A TEMPERATURE FIELD WHEN TURNING
WITH VIBRATIONS SUPERPOSITION**

© 2018

A.N. Unyanin, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor

P.R. Finageev, postgraduate student

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: turning; turning with vibrations superposition; turning with superposition of ultrasonic vibrations; heat flow; temperature field.

Abstract: The temperature of a cutting process influences significantly the quality of the treated surface and the performance of a tool. The rational use of vibrations, including the ultrasonic frequency vibrations is one of the means to improve the efficiency of a cutting process. However, there are no analytical studies of the temperature of turning with vibration superposition. It was accepted that the total heat output power when turning was equal to the sum of heat output powers of sources aroused as the result of the transition to the heat of work of deformation and work of friction forces on the leading and flank surfaces of a tool. The paper presents the mathematical dependences for calculation of the components of the total power of heat release. The authors took into account that the yield stress, which determines the cutting and frictional forces on the contact surfaces of a cutter, workpiece, and chip, depends on the temperature in the plastic deformation area. The law of distribution of thermal power density on the shear plane was taken as uniform; the combined law was adopted on the surface of the contact of a chip with the front surface of a cutter; the asymmetric normal law was adopted on the surface of the contact of a cutter with a workpiece. The authors gave the dependence for the calculation of the cutting depth when applying vibrations in the direction perpendicular to the treated surface. Heat exchange at the boundaries of the objects contacting with the process liquid or air is given in the form of the Newton-Richman law. The thermal conductivity equations of the contacting objects were solved in combination with the general boundary conditions in the contact zone using the finite element method. The method of calculation based on the discrete analogs of the heat conduction equations is implemented in the original programs. The authors compared the results of calculation of temperatures when turning without the vibrations superposition with the experimentally obtained results, in this case, the discrepancy between the calculated and experimental values does not exceed 10 %. The simulation of the turning process with the superposition of ultrasonic vibrations showed that the main component of the cutting force P_z reduced by a mean of 11 %, the maximum temperature in the zone of contact of the back surface of a cutter with a workpiece reduced by 20 %, and the maximum temperature in the zone of contact of the front surface of a cutter with a chip reduced by 26 %.