

УДК 621.923.02

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДВИЖНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ПРИ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССА ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2024 Я.М. Гордиенко

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

Выполнен анализ известных математических моделей для описания теплового состояния зоны резания при прерывистом шлифовании. Выполнено теоретическое обоснование выбора тепловой модели для описания состояния зоны резания. Разработана математическая модель состояния зоны резания при прерывистом шлифовании титановых сплавов, базирующаяся на принципах суперпозиции при сложении температурных полей.

Ключевые слова: зона резания, подвижный источник тепла, прерывистое шлифование, теплопроводность, тепловое поле, тепловая модель, титановый сплав.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-298-305

EDN: JGZWSV

ВВЕДЕНИЕ

Высокие локальные температуры в зоне резания являются ключевой проблемой обработки титановых сплавов. Высокая удельная мощность резания, наряду с низкой теплопроводностью титана и сплавов на его основе, при шлифовании, создают благоприятные условия для развития в зоне резания, критических и закритических температур, сопровождающихся возникновением поверхностных прижогов. Одним из наиболее эффективных способов снижения теплонапряженности при шлифовальной обработке является метод прерывистого (дискретного) шлифования. В отличие от сплошного шлифования, где рабочая часть периферии шлифовального круга находится в постоянном контакте с поверхностью заготовки, при прерывистом шлифовании имеет место прерывание процесса резания за счет использования конструкции шлифовального круга, в которой рабочая часть (выступы) чередуется с нерабочей частью. Дискретизация контакта поверхности шлифовального круга с заготовкой, способствует снижению теплонапряженности зоны резания, улучшению условий проникновения СОЖ в зону резания и удалению из неё стружки.

Несмотря на это, вопросы рационального проектирования технологического инструмента для реализации метода прерывистого шлифования, в настоящее время, проработаны *Гордиенко Ярослав Михайлович, аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: gordienko120@yandex.ru*

недостаточно полно. Ключевую роль в проектировании инструментального оснащения дискретного шлифования играет выбор и применение наиболее адекватной тепловой модели, описывающей изменение теплового состояния зоны обработки в зависимости от конфигурации шлифовального инструмента и технологических режимов обработки с учетом теплофизических особенностей обрабатываемого материала.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование тепловых характеристик процесса шлифовальной обработки находит свое отражение в работах таких исследователей как: В. А. Сипайлова, А. В. Якимова, Е. П. Калинина и др. [1, 2, 3, 4]. В работе А. Н. Резникова [4], на основании положений теории вероятности, были разработаны зависимости для определения локальной и средней температуры в зоне резания при шлифовании. Е. П. Калинин [3], сформулировал зависимости для определения составляющих сил резания для различных видов шлифовальной обработки.

А. В. Якимовым и В.А. Сипайловым получены аналитические выражения для решения двумерного уравнения теплопроводности для случая нестационарного теплового потока от движущегося прерывистого источника тепла [1, 2]. Полученное авторами аналитическое выражение для определения температуры в зоне резания при прерывистом шлифовании массивной заготовки имеет вид:

$$T_K = \frac{2}{\sqrt{C_{м.з.} \cdot \rho_{м.з.} \cdot \lambda_{м.з.}}} \cdot \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^K q_{нагр} \cdot \sqrt{[\tau - (i-1) \cdot (\tau_1 + \tau_2)]} \cdot \\ \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^K t_i}{2 \cdot \sqrt{a_{м.з.}} \cdot \sqrt{\tau - (i-1) \cdot (\tau_1 + \tau_2)}} \right) - \\ - \sum_{i=1}^K q_i \cdot \sqrt{a_{м.з.}} \cdot [\tau - i \cdot \tau_1 - (i-1) \cdot \tau_2] \cdot \\ \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^K t_i}{2 \cdot \sqrt{a_{м.з.}} \cdot \sqrt{\tau - i \cdot \tau_1 - (i-1) \cdot \tau_2}} \right) \end{array} \right], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где $C_{м.з.}$ – теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К);

$\rho_{м.з.}$ – плотность материала заготовки, кг/м³;

$K = n_{сегм}$ – количество абразивных сегментов, ед.

$\lambda_{м.з.}$ – коэффициент теплопроводности материала заготовки, Вт/(м·К);

$a_{м.з.} = \frac{\lambda_{м.з.}}{C_{м.з.} \cdot \rho_{м.з.}}$ – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м²/с;

t_i – фактическая толщина слоя, удаляемого абразивным сегментом, м;

$q_{нагр}$ – удельный тепловой поток от источника нагрева, Вт/м²;

i – порядковый номер микроцикла;

τ, τ_1, τ_2 – временные характеристики микроцикла резания и охлаждения, определяемые как:

$$\tau = \frac{\sqrt{D \cdot t}}{V_n}, \text{ с}; \quad (2)$$

$$\tau_1 = \frac{l_1}{V_{кр}}, \text{ с}; \quad (3)$$

$$\tau_2 = \frac{l_2}{V_{кр}}, \text{ с}. \quad (4)$$

Удельная мощность теплового источника, может быть определена с допущением о полном преобразовании механической мощности резания в тепло как [5]:

$$q_{нагр} = \psi \cdot \frac{N}{F_k}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где N – мощность резания, Вт;

F_k – площадь контакта абразивного сегмента и заготовки, м²;

$\psi = 0,6 \div 0,9$ – коэффициент, характеризующий долю тепла, уходящего в заготовку, аналитическое выражение для определения численного значения которого имеет вид [5]:

$$\psi = \frac{1}{1,25 + \frac{\lambda_{м.з.}}{\lambda_k} \cdot \frac{a_{м.з.}}{\sqrt{V_{кр} \cdot l_1}}}, \quad (6)$$

где λ_k – коэффициент теплопроводности абразивного материала, Вт/(м·К).

Мощность резания при шлифовании может быть определена из известной зависимости [3]:

$$N = \frac{\pi \cdot v \cdot R \cdot P_z}{30} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{60 \cdot 1020}, \text{ Вт}. \quad (7)$$

В работе Н. В. Лищенко и В. П. Ларшина [6], сформулирована зависимость для определения средней температуры нагрева слоя на глубине x от зоны резания:

$$T_K(x) = \frac{2 \cdot q_{нагр}}{\lambda_{м.з.}} \cdot \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_1] \cdot \\ \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_1]} \right) - \\ - \sum_{i=1}^n \sqrt{a_{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2] \cdot \\ \cdot \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]} \right) \end{array} \right], \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8)$$

Недостатком приведенных математических моделей выступает допущение о равенстве численных значений положительного и отрицательного (мнимого) тепловых источников или нулевом значении последнего (рис. 1). В действительности, при прерывании процесса резания, в зависимости от технологических условий работы круга (с СОЖ или без), полосовая зона нагрева будет подвергаться охлаждению под действием СОЖ или воздуха, захватываемых впадинами круга. При этом следует ожидать, что численные значения удельной интенсивности отвода тепла будут иметь ненулевые значения, т.е. принятые указанными авторами допущения что $q_{охл.i} = q_{нагр.i}$ или $q_{охл.i} = 0$ нельзя считать обоснованно справедливыми.

К тому же, нераскрытыми остаются вопросы выбора базовой тепловой модели, определяющей закономерности формирования температурных полей, так как по сути, рассматриваемый источник тепла для описания теплового состояния поверхностного слоя заготовки является нестационарным. Для решения данной задачи, для начала необходимо определить вид и характер движения теплового источника, а также модель нагреваемого тела.

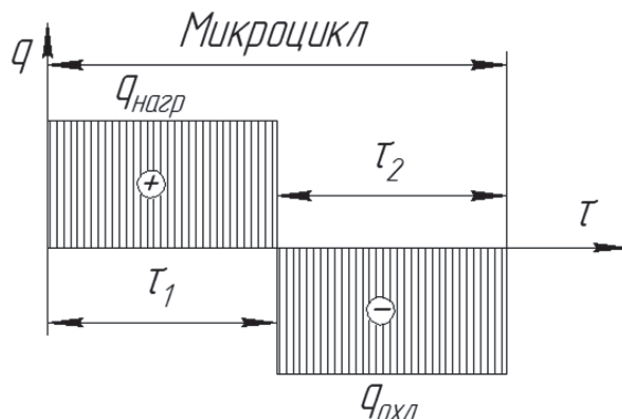


Рис.1 Схема изменения теплонапряженности зоны резания при прерывистом шлифовании периферией круга

Определяющими, для выбора адекватного математического аппарата, в соответствии с известными положениями теории термодинамики, выступают следующие параметры процесса [7]:

- глубина распространения теплового фронта за время воздействия источника тепла:

$$h_T = \sqrt{4 \cdot a_{м.з.} \cdot \tau}, \text{ м;} \quad (9)$$

- скорость распространения теплового фронта во время воздействия источника тепла:

$$v_T = \sqrt{\frac{a_{м.з.}}{\tau}}, \text{ м/с.} \quad (10)$$

где $\tau = \tau_1 = \frac{l_1}{V_{кр}}$ – время воздействия источника тепла, с;

- максимальный радиус пятна контакта источника тепла r_T с заготовкой в плане.

В связи с тем, что при решении задачи совершенствования процесса шлифования титановых сплавов практический интерес представляют именно пиковые значения температур в зоне резания, а не характер их распространения в теле заготовки, то для упрощения расчетов пятно контакта источника тепла – абразивного сегмента с заготовкой можно рассматривать в виде теплового источника с нормально-круговым пятном контакта в плане, радиус которого описывается следующим уравнением:

$$r_T = \frac{\max\{l_k; B\}}{2}, \text{ м.} \quad (11)$$

Так, в случае, если $r_T \gg h_T$, к процессу нагрева применима модель распределенного источника тепла, для которого, отводом тепла из зоны нагрева через материал можно пренебречь, в ином случае, когда $r_T \leq h_T$ процесс нагрева описывается моделью точечного источника, учитывающей отвод тепла из зоны нагрева посредством теплообмена в материале заготовки. Далее, необходимо определить характер движения теплового источника относительно нагреваемого тела, при $V_n + V_{кр} > v_T$, распространение тепла в заготовке происходит по модели быстродвижущегося источника, где тепло распространяется преимущественно вдоль двух векторов: нормали по отношению к поверхности контакта и вектора, коллинеарного относительно вектора продольной подачи заготовки. При условии $V_n + V_{кр} \leq v_T$ для описания закономерностей распространения теплового поля в материале заготовки применима модель точечного движущегося источника, при этом, учитывается распространение тепла по всем векторам декартовой системы координат. После определения конфигурации теплового источника, следует определить адекватную математическую модель нагреваемого тела. При условии, когда любой геометрический размер заготовки менее h_T , нагреваемое тело следует рассматривать в соответствии с моделью тонкой пластиной, в ином случае, может быть применена теплофизическая модель полу бесконечного тела [7].

Далее, задаваясь справочными значениями необходимых теплофизических свойств некоторых промышленно выпускаемых марок титановых сплавов [8-11], выполним расчет численных значений параметров, для выбора адекватных теплотехнических моделей теплового источника и нагреваемого тела.

Исходные данные, а также результаты расчета численного значения коэффициента температуропроводности сводим в таблицу 1, а в таблицу 2 результаты расчета времени воздействия теп-

лового импульса τ для диапазона окружных скоростей $V_{кр} = 20,0 \div 80,0$ м/с при $R = 0,1$ м, $\varphi_{сегм} = 11,5^\circ$ и $l_1 = \frac{\pi \cdot 0,1}{180^\circ} \cdot 11,5^\circ = 0,02$ м.

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчета значений коэффициента температуропроводности некоторых промышленных марок титановых сплавов [8-11]

Марка титанового сплава	Теплоемкость $C_{м.з.}$, Дж/(кг·К)		Коэффициент теплопроводности $\lambda_{м.з.}$, Вт/(м·К)		Плотность $\rho_{м.з.}$, кг/м ³		Коэффициент температуропроводности $a_{м.з.}$, м ² /с	
	при 20,0 °С	при 500,0 °С	при 20,0 °С	при 500,0 °С	при 20,0 °С	при 500,0 °С	при 20,0 °С	при 500,0 °С
ОТ4-1	333,0*	754,0	9,6	14,6*	4550,0	н/д	0,0000063	-
BT1	71,0	650,0	16,0	н/д	4508,0	4321,8	0,0000500	-
BT3-1	100,0*	670,0	8,0	14,2*	4500,0	н/д	0,0000178	-
BT4	100,0*	703,0*	8,5	14,5*	4600,0	н/д	0,0000185	-
BT5	118,0	712,0	8,8	14,0*	4404,2	4324,3	0,0000169	0,0000045
BT6	82,0	795,0	8,4	12,0*	5292,4	4098,2	0,0000194	0,0000037
BT14	78,0*	670,0	8,4	13,8	4520,0	н/д	0,0000238	-
BT18	95,0*	712,0	7,1	13,8	4540,0	н/д	0,0000165	-
BT22	102,0*	712,0	8,3	14,6	4519,8	4442,8	0,0000180	0,0000046
BT25	123,0	0,753	6,3	13,4	4500,0	н/д	0,0000114	-

* - значение, определенное интерполяцией

Таблица 2. Результаты расчета времени воздействия теплового импульса

Время воздействия теплового импульса τ , с, в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с						
20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
0,00100	0,00067	0,00050	0,00040	0,00033	0,00029	0,00025

Подставляя найденные значения, выполним расчет численных значений параметров h_T и v_T для рассматриваемых условий, результаты которого сводим в таблицы 3 и 4.

Таблица 3. Результаты расчета глубины распространения теплового фронта

Марка титанового сплава	h_T , м, при 20,0 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с						
	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
ОТ4-1	0,00016	0,00013	0,00011	0,00010	0,00009	0,00009	0,00008
BT1	0,00045	0,00037	0,00032	0,00028	0,00026	0,00024	0,00022
BT3-1	0,00027	0,00022	0,00019	0,00017	0,00015	0,00014	0,00013
BT4	0,00027	0,00022	0,00019	0,00017	0,00016	0,00015	0,00014
BT5	0,00026	0,00021	0,00018	0,00016	0,00015	0,00014	0,00013
BT6	0,00028	0,00023	0,00020	0,00018	0,00016	0,00015	0,00014
BT14	0,00031	0,00025	0,00022	0,00020	0,00018	0,00017	0,00015
BT18	0,00026	0,00021	0,00018	0,00016	0,00015	0,00014	0,00013
BT22	0,00027	0,00022	0,00019	0,00017	0,00015	0,00014	0,00013
BT25	0,00021	0,00017	0,00015	0,00014	0,00012	0,00011	0,00011
h_T , м, при 500,0 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с							
ОТ4-1	-	-	-	-	-	-	-
BT1	-	-	-	-	-	-	-
BT3-1	-	-	-	-	-	-	-
BT4	-	-	-	-	-	-	-
BT5	0,00013	0,00011	0,00009	0,00008	0,00008	0,00007	0,00007

BT6	0,00012	0,00010	0,00009	0,00008	0,00007	0,00007	0,00006
BT14	-	-	-	-	-	-	-
BT18	-	-	-	-	-	-	-
BT22	0,00014	0,00011	0,00010	0,00009	0,00008	0,00007	0,00007
BT25	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4. Результаты расчета скорости распространения теплового фронта

Марка титанового сплава	v_T , м/с, при 20,0 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с						
	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
1	2	3	4	5	6	7	8
OT4-1	0,07937	0,09697	0,11225	0,12550	0,13817	0,14739	0,15875
BT1	0,22361	0,27318	0,31623	0,35355	0,38925	0,41523	0,44721
BT3-1	0,13342	0,16299	0,18868	0,21095	0,23225	0,24775	0,26683
BT4	0,13601	0,16617	0,19235	0,21506	0,23677	0,25257	0,27203
BT5	0,13000	0,15882	0,18385	0,20555	0,22630	0,24140	0,26000
BT6	0,13928	0,17016	0,19698	0,22023	0,24246	0,25864	0,27857
BT14	0,15427	0,18847	0,21817	0,24393	0,26855	0,28648	0,30854
BT18	0,12845	0,15693	0,18166	0,20310	0,22361	0,23853	0,25690
BT22	0,13416	0,16391	0,18974	0,21213	0,23355	0,24914	0,26833
BT25	0,10677	0,13044	0,15100	0,16882	0,18586	0,19827	0,21354
v_T , м/с, при 500,0 °С в зависимости от окружной скорости вращения круга $V_{кр}$, м/с							
OT4-1	-	-	-	-	-	-	-
BT1	-	-	-	-	-	-	-
BT3-1	-	-	-	-	-	-	-
BT4	-	-	-	-	-	-	-
BT5	0,06708	0,08195	0,09487	0,10607	0,11677	0,12457	0,13416
BT6	0,06083	0,07431	0,08602	0,09618	0,10589	0,11295	0,12166
BT14	-	-	-	-	-	-	-
BT18	-	-	-	-	-	-	-
BT22	0,06782	0,08286	0,09592	0,10724	0,11807	0,12594	0,13565
BT25	-	-	-	-	-	-	-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненные расчеты показывают, что для широкой номенклатуры промышленных марок титановых сплавов и условий обработки максимальная глубина распространения теплового фронта составляет порядка 0,45 мм, что, для широкого диапазона поперечных подач и размеров абразивных сегментов, всегда будет удовлетворять условию $r_T > h_T$ и, для подавляющего большинства производственных задач, условию $\min\{l_{зар}; b_{зар}; h_{зар}\} > h_T$, где $l_{зар}, b_{зар}, h_{зар}$ – линейные размеры заготовки. В тоже время, в рассматриваемом диапазоне окружных скоростей вращения и скоростей подач $V_{кр} = 20,0 \div 80,0$ м/с, $V_{п} = 0,05 \div 0,25$ м/с, очевидно, выполняется условие $V_{п} + V_{кр} > v_T$. Таким образом, для описания процесса нагрева поверхностного слоя заготовки при плоском прерывистом шлифовании периферией круга целесообразно рассматривать модель распределенного (с равномерной плотностью теплового потока по пятну контакта) быстро движущегося источника тепла, нагревающего полубесконечное тело.

Известно, что периодическая функция распределения тепловой мощности от абразивных сегментов удовлетворяет условиям Дирихле, в таком случае, изменение интенсивности действия теплового источника может быть выражено через функцию, разложенную в ряд Фурье. Тогда, согласно [7], выражение для определения температуры нагрева зоны контакта абразивного сегмента и заготовки для случая нагрева полубесконечного тела прерывистым движущимся источником тепла с учетом принципа суперпозиции будет иметь вид:

$$T_{\text{нагр.к}}(x, R, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{\text{нагр}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{м.з.}} \cdot \vec{r}} \cdot e^{\left(\frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r} \cdot \sqrt{A_k + 0,5})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}}\right)} \cdot \left[a_k \cdot \cos\left(k \cdot \omega \cdot \Delta\tau - \frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r} \cdot \sqrt{A_k + 0,5})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}}\right) + b_k \cdot \sin\left(k \cdot \omega \cdot \Delta\tau - \frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r} \cdot \sqrt{A_k + 0,5})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}}\right) \right], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (12)$$

где ω – циклическая частота импульсов, 2 π /с;

$V_{\text{т.и.}} = V_{\text{п}} + V_{\text{кр}}$ – скорость движения теплового источника относительно поверхности нагреваемого тела, м/с;

T_0 – исходная температура заготовки, $^\circ\text{C}$;

$\vec{r} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – радиус-вектор;

x, y, z – линейные координаты расчетной точки, м;

a_k, b_k – коэффициенты Фурье;

k – порядковый номер импульса;

$\Delta\tau$ – период, отсчитываемый по временной шкале, с;

A_k – аргумент, определяемый как [7]:

$$A_k = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot k \cdot a_{\text{м.з.}} \cdot \omega}{V_{\text{т.и.}}}\right)^2}. \quad (13)$$

Циклическая частота импульсов определяется в соответствии со следующей зависимостью:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{\tau_{\text{п}}}, 2\pi/\text{с}, \quad (14)$$

где $\tau_{\text{п}} = \tau_1 + \tau_2$ – период микроцикла, с.

По отношению к временной оси график функции изменения интенсивности подвода тепла в зону резания от воздействия абразивных сегментов круга будет иметь вид несимметричной функции, для описания которой используется ряд Фурье из синусов для которого, значение коэффициента Фурье b_k может быть определено из следующего выражения [7]:

$$b_k = (-1)^k \cdot \frac{2 \cdot q_{\text{нагр}}}{\pi \cdot k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{\text{п}}}{\tau_1}\right). \quad (15)$$

Значение коэффициента a_k при этом будет равно нулю.

Тогда, решая совместно уравнения (12) и (15), можно вывести следующее выражение для определения максимальной температуры в центре пятна нагрева на границе контакта абразивного сегмента с поверхностью заготовки:

$$T_{\text{нагр}}(x, R, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{\text{нагр}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{м.з.}} \cdot \vec{r}} \cdot e^{\left(\frac{V_{\text{т.и.}} \cdot (x + \vec{r})}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}}\right)} \cdot F(R, \Delta\tau), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (16)$$

$F(R, \Delta\tau)$ – функция, учитывающая периодичность действия источника тепла:

$$F(R, \Delta\tau) = 1 + \frac{2 \cdot (\tau_1 + \tau_2)}{\pi \cdot \tau_1} \cdot \sum_{k=1}^n \left[\frac{(-1)^k}{k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{\text{п}}}{\tau_1}\right) \cdot e^{\left(\frac{V_{\text{т.и.}} \cdot \vec{r}}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}}\right)} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\tau_1 + \tau_2} \cdot \Delta\tau - \frac{V_{\text{т.и.}} \cdot \vec{r}}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}} \cdot \sqrt{A_k + 0,5}\right) \right]. \quad (17)$$

Так как для решения практической задачи предупреждения возникновения прижогов интерес представляет распределение температуры вдоль вектора движения заготовки, то $\vec{r} = x$, в таком случае, выражения (16) и (17) могут быть записаны как:

$$T_{\text{нагр}}(x, \Delta\tau) = T_0 + \frac{q_{\text{нагр}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{м.з.}} \cdot x} \cdot e^{\left(\frac{V_{\text{т.и.}} \cdot x}{a_{\text{м.з.}}}\right)} \cdot F(x, \Delta\tau), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (18)$$

$$F(x, \Delta\tau) = 1 + \frac{2 \cdot (\tau_1 + \tau_2)}{\pi \cdot \tau_1} \cdot \sum_{k=1}^n \left[\frac{(-1)^k}{k} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot k \cdot \tau_{\text{п}}}{\tau_1}\right) \cdot e^{\left(\frac{V_{\text{т.и.}} \cdot x}{a_{\text{м.з.}}}\right)} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\tau_1 + \tau_2} \cdot \Delta\tau - \frac{V_{\text{т.и.}} \cdot x}{2 \cdot a_{\text{м.з.}}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot k \cdot a_{\text{м.з.}} \cdot \omega}{V_{\text{т.и.}}}\right)^2}\right) + 0,5}\right) \right]. \quad (19)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для получения достоверных результатов о тепловом состоянии поверхностного слоя заготовки необходимо учесть охлаждение поверхности заготовки в период прохождения над поверхностью контакта впадины круга. Тогда,

придерживаясь принципа суперпозиции при сложении температурных полей, охлаждение заготовки при прохождении впадины может быть описано через разницу между температурой нагрева заготовки после первой половины микроцикла и температурой охлаждения заготовки за время действия второго микроцикла.

В отличие от процесса нагрева, где теплообмен происходит через поверхность, ограниченную пятном контакта абразивного сегмента и материала заготовки, теплообмен в процессе охлаждения, условно, происходит вдоль всей поверхности контакта предыдущего абразивного сегмента и заготовки одновременно. Следовательно, часть выражения (8), определяющая изменение температуры заготовки при охлаждении, условно можно считать справедливой, тогда выражение для определения изменения температуры заготовки при охлаждении примет следующий вид:

$$T_{\text{охл}}(x) = \frac{2 \cdot q_{\text{охл}}}{\lambda_{\text{м.з.}}} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_{\text{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]} \cdot \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{м.з.}} \cdot [\tau - (i-1) \cdot \tau_2]}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (20)$$

где $q_{\text{охл}}$ – удельный тепловой поток при охлаждении, Вт/м².

Неизвестной переменной в данном выражении является величины удельного теплового потока охлаждения заготовки. Исходя из геометрической конфигурации профиля, образуемого заготовкой и шлифовальным кругом при прерывании резания и особенностей распределения охлаждающей среды, для определения параметров охлаждения заготовки могут быть использованы зависимости, описывающие частный случай конвективного теплообмена при вынужденном продольном движении охлаждающей среды вдоль неограниченной плоской стенки [5].

ВЫВОДЫ

Проведен анализ известных математических моделей для описания теплового состояния зоны резания при прерывистом шлифовании титановых сплавов. Показано, что существующие подходы к описанию теплового состояния зоны резания не учитывают кинематику процесса резания, вносящую существенный вклад в его термодинамику. На основании обобщенных и систематизированных данных по теплофизическим свойствам промышленных марок титановых сплавов, было выполнено математическое обоснование применимости теплофизической модели быстродвижущегося источника тепла, нагревающего полубесконечное тело для описания теплового состояния зоны резания при использовании метода прерывистого шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.

– Текст : непосредственный.

2. Якимов, А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев; Одесса: Вища школа, 1986. – 176 с. – Текст : непосредственный.
3. Калинин, Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дисс. ... докт. техн. наук / Е. П. Калинин ; ОАО «ЗТЛ». – Рыбинск, 2006. – 414 с. – Текст : непосредственный.
4. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах : учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металло-режущие станки и инструменты» / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с. – Текст : непосредственный.
5. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с. – Текст : непосредственный.
6. Лищенко, Н. В. Определение температуры шлифования при периодическом тепловом потоке / Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин. – Текст : непосредственный // Вестник УГАТУ. – 2013. – № 8 (61). – С. 117-122.
7. Рыкалин, Н. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с. – Текст : непосредственный.
8. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с. – Текст : непосредственный.
9. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачёв, И. С. Польшкин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с. – Текст : непосредственный.
10. Магницкий, О. Н. Литейные свойства титановых сплавов / О. Н. Магницкий. – Л. : Машиностроение, 1968. – 120 с. – Текст : непосредственный.
11. Глазунов, С. Г. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – М. : Металлургия, 1974. – 368 с. – Текст : непосредственный.

**SUBSTANTIATION OF THE APPLICABILITY OF THE MATHEMATICAL MODEL
OF A MOVABLE HEAT SOURCE IN DESCRIBING THE PROCESS
OF INTERMITTENT GRINDING OF TITANIUM ALLOYS**

© 2024 Y.M. Gordienko

Samara State Technical University, Samara, Russia

The analysis of known mathematical models for describing the thermal state of the cutting zone during intermittent grinding is performed. The theoretical substantiation of the choice of a thermal model for describing the state of the cutting zone has been performed. A mathematical model of the state of the cutting zone during intermittent grinding of titanium alloys has been developed, based on the principles of superposition when adding temperature fields.

Key words: cutting zone, movable heat source, intermittent grinding, thermal conductivity, thermal field, thermal model, titanium alloy.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-298-305

EDN: JGZWSV

REFERENCES

1. *Sipailov, V. A.* Thermal processes during grinding and surface quality management / V. A. Sipailov. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 167 p. – Text : direct.
2. *Yakimov, A. V.* Intermittent grinding / A. V. Yakimov. – Kiev; Odessa: Vishcha shkola, 1986. – 176 p. – Text : direct.
3. *Kalinin, E. P.* Theory and practice of performance management of abrasive processing, taking into account tool bluntness : specialty 05.03.01 "Technologies and equipment of mechanical and physico-technical processing": diss... Doct. Techn. Sciences / E. P. Kalinin ; JSC "ZTL". – Rybinsk, 2006. – 414 p. – Text : direct.
4. *Reznikov, A. N.* Thermal processes in technological systems : textbook for universities in the specialties "Engineering technology" and "Metal-cutting machines and tools" / A. N. Reznikov, L. A. Reznikov. – M. : Mechanical Engineering, 1990. – 288 p. – Text : direct.
5. *Kutateladze, S. S.* Heat transfer and hydrodynamic resistance : reference. the manual. / S. S. Kutateladze. – M. : Ergoatomizdat, 1990. – 367 p. – Text : direct.
6. *Lischenko, N. V.* Determination of grinding temperature at periodic heat flow / N. V. Lischenko, V. P. Larshin. – Text : direct // UGATU Herald. – 2013. – № 8 (61). – Pp. 117-122.
7. *Rykalin, N. N.* Laser and electron beam processing of materials : handbook / N. N. Rykalin, A. A. Uglov, I. V. Zuev, A. N. Kokora. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 496 p. – Text : direct.
8. *Illarionov, A. G.* Technological and operational properties of titanium alloys : a textbook / A. G. Illarionov, A. A. Popov. Yekaterinburg : Ural Publishing House. unita, 2014. – 137 p. – Text : direct.
9. *Ilyin, A. A.* Titanium alloys. Composition, structure, properties : handbook / A. A. Ilyin, B. A. Kolachev, I. S. Polkin. – M. : VILS-MATI, 2009. – 520 p. – Text : direct.
10. *Magnitsky, O. N.* Foundry properties of titanium alloys / O. N. Magnitsky. – L. : Mashinostroenie, 1968. – 120 p. – Text : direct.
11. *Glazunov, S. G.* Structural titanium alloys / S. G. Glazunov, V. N. Moiseev. – M.: Metallurgy, 1974. – 368 p. – Text : direct.