

ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Сизый Ю.А., докт. техн. наук, НТУ «ХПИ»,
Сталинский Д.В., докт. техн. наук, ГНТЦ «Энергосталь»,
Ушаков А.Н., канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»

В статье предложено аналитическое решение задачи последовательного резания абразивными зернами след в след друг другу при шлифовании. Это решение на примере сравнивается с моделированием методом конечных разностей

Введение. В статьях [1,2] представлена разработка конечно-разностной модели нагрева поверхности обрабатываемой шлифованием. При этом обрабатываемая поверхность представляется как набор тонких адиабатических стержней. Каждый такой стержень, проходя зону контакта круга с обрабатываемой поверхностью заготовки подвергается последовательному резанию абразивными зернами, режущими след в след друг другу. При этом каждое зерно срезает со стержня какую-то его часть и величина этой части (толщина среза) с каждым последующим резом уменьшается. Расчет параметров такого резания: толщины среза, время резания, время между резами и др., рассчитываемая согласно алгоритма, описанного в [3].

При перерезании стержня зерном тепловые потоки от работы деформации на плоскости сдвига и трения на задней поверхности зерна нагревают стержень. Плоскость сдвига за время перерезания стержня перемещается вдоль него, т.е. источник тепла от работы деформации движется вдоль стержня с рассчитываемой скоростью и временем. Источник тепла от работы трением на задней поверхности (площадки износа зерна) действует сразу же за источником тепла от работы деформации и в отличие от него не перемещается вдоль стержня. Расчет тепловых потоков от работы деформации и трения представлен в [4].

Рассматриваемая модель в [1, 2] позволяет учитывать изменение теплофизических свойств обрабатываемого материала в зависимости от температуры, в чем ее значительное достоинство. Однако при этом модель является громоздкой, включает в себя большое количество элементов конечной разности. Изменение условий шлифования (режимов резания и характеристики круга) для моделирования согласно разработанной модели требует полного ее перестроения, так как меняется количество резов и продолжительность их. Нужно изменять положение источников тепла вдоль стержня, т.е. практически надо создавать новую модель. Таким образом, становится практически невозможным проведение широких исследований нагрева поверхности шлифованием при его различных условиях. Поэтому целью работы является создание модели последовательного резания абразивными зернами шлифуемой поверхности с возможностью оперативного, с небольшой трудоемкостью изменения условий шлифования.

Результаты исследований. Создание данной модели потребовало отказаться от важного достоинства предыдущей [1, 2], т.е. от учета изменения тепло-

физических свойств обрабатываемого материала с изменением его температуры. Однако учет этих свойств предполагается проводить косвенно сравнением конечно-разностной модели и аналитической предлагаемой в настоящей статье.

Итак, рассмотрим аналитическую модель нагрева адиабатического стержня тепловыми потоками от работы деформации и трения на задней поверхности зерна, координата положения которых вдоль стержня с каждым резом дискретно смещается вдоль стержня приближаясь с каждым резом к обрабатываемой поверхности. Математическая постановка решаемой задачи теплопроводности может быть представлена одномерным уравнением теплопроводности и граничными условиями:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$q_p(x_i, \tau_{1i}) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} q_p(x_i, \tau_{1i}) & \text{и} \ddot{\text{д}} \ddot{\text{е}} \quad t_i < t \leq t_i + \tau_{1i}; \\ 0 & \text{и} \ddot{\text{д}} \ddot{\text{е}} \quad t_i + \tau_{1i} < t < t_i; \end{cases}$$

$$T(\infty, t) = 0^\circ \text{C};$$

где $i=0, 1 \dots n$ – номер реза; $q_p(x_i, \tau_{1i})$ – тепловой поток от работы деформации для i -того реза с координатой вдоль стержня x_i и временем его действия τ_{1i} ; $q_{tp}(x_i, \tau_{tp})$ – тепловой поток от работы трения на задней поверхности зерна с координатой x_i и временем действия τ_{tp} . λ, a – коэффициенты тепло- и температуропроводности обрабатываемого материала.

Координату x_i положения источника тепла на стержне отсчитываем от поверхности обработанной детали. Положительное ее значение в тело заготовки, отрицательное в тело детали. Решение уравнения (1) описано во многих литературных источниках, а также, в частности, получено операционным методом в [5] и методом источников в [6] при подстановке в это решение скорости движения источника тепла $V=0$:

$$T(x,t) = \frac{q}{2 \cdot \tilde{N} \rho \cdot \sqrt{\pi} \cdot a} \cdot \int_0^\tau \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right), \quad (2)$$

где $C\rho$ – объемная теплоемкость обрабатываемого материала.

Если в (2) подставить значение $q=q_p + q_{tp}$ согласно условий решаемой задачи, то получим:

$$T(x,t) = \frac{q_p}{2 \cdot C\rho \cdot \sqrt{\pi} \cdot a} \cdot \int_{t_d}^{t_h} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(\frac{-(x)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right) + \frac{q_{tp}}{2 \cdot C\rho \cdot \sqrt{\pi} \cdot a} \cdot \int_{t_i}^{t_i+\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(\frac{-(x)^2}{4 \cdot a \cdot (t-\tau)}\right), \quad (3)$$

где q_p – тепловой поток от работы деформации; q_{tp} – тепловой поток от работы трения на задней поверхности зерна; t_d, t_h – время соответственно начала и конца положения плоскости сдвига на стержне (время начала и конца работы деформации на стержне); t_i – время действия источника тепла от работы трения на задней поверхности зерна.

Поскольку за время прохождения стержня через поверхность контакта круга с заготовкой стержень подвергается n -ому количеству резов, то в общем случае для i -го реза уравнение (3) будет следующим:

$$T_i(x_i, t) = \frac{q_p(x_i, \tau_{1i})}{2 \cdot c \rho \sqrt{\pi \cdot a}} \int_{\tau_{di}}^{t} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp \frac{-(x_i)^2}{4 \cdot a^2 (\tau-t)} + \frac{q_{tp}(x_i, \tau_{ii})}{2 \cdot c \rho \sqrt{\pi \cdot a}} \int_{\tau_{hi}}^{t} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp \frac{-(x_i)^2}{4 \cdot a^2 (\tau-t)}. \quad (4)$$

При программировании в «Mathcad» значения τ_{di} , τ_{hi} , x_i можно задать векторами $\tau_{di} = i \cdot t_{mp}$, $\tau_{hi} = \tau_{di} + \tau_{li}$, где τ_{li} – время действия работы деформации при i -ом резе. Общую картину нагрева и охлаждения поверхности заготовки можно получить суммированием (4):

$$T(x) = \sum_{i=0}^n T_i(x_i, t). \quad (5)$$

Реализация решения (4) в пакете «Mathcad» имеет некоторые особенности. Они обусловлены тем, что вычисляя (4) для времени наблюдения $\tau < \tau_{di}$ получаются в первом и втором слагаемом (4) комплексные числа. Эти комплексные числа нельзя складывать с действительными значениями температуры. Поэтому необходимо воспользоваться условным оператором if позволяющим обнулять решения интегралов (4) для времени наблюдения меньше времени первого действительного значения решаемого интеграла. Обозначим это время для первого интеграла τ_{pi} , а для второго τ_{hi} . При этом решение (4) будет выглядеть следующим образом:

$$T_i(x_i, t) = \text{if} \left[\tau < \tau_{pi}, 0, \frac{q_p(x_i, \tau_{1i})}{2 \cdot c \rho \sqrt{\pi \cdot a}} \int_{\tau_{di}}^{t} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp \frac{-(x_i)^2}{4 \cdot a^2 (\tau-t)} \right] + \text{if} \left[\tau < \tau_{hi}, 0, \frac{q_t}{2 \cdot c \rho \sqrt{\pi \cdot a}} \int_{\tau_{hi}}^{t} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp \frac{-(x_i)^2}{4 \cdot a^2 (\tau-t)} \right]. \quad (6)$$

Определение времен τ_{pi} , τ_{hi} производится решением первого и второго слагаемых (4) с использованием команд zoom (масштаб) и trace (трассирование).

Рассмотрим пример описанного решения для следующих условий круглого наружного врезного шлифования. Радиус круга $R=375$ мм, радиус шлифуемой детали $r=50$ мм, скорость резания 50 м/с, скорость окружной подачи 833 мм/с, глубина шлифования 0,02 мм, максимальная толщина среза $a_{zmax}=0,005$ мм, материал заготовки сталь X18H10T.

Для этих условий в [7] рассчитано время между резами $t_{mp}=2.137 \cdot 10^{-4}$ и количество резов $n=7$. Расчет значений времени действия теплового потока от работы деформации при i -ом резе τ_{li} и координаты x_i , на которой выделяются тепловые потоки от работы деформации и трения на задней поверхности, рассчитаны согласно алгоритма, приведенного в [3], табл. 1.

Таблица 1

Параметры последовательных резов абразивными зёрнами

Номер реза	0	1	2	3	4	5	6
τ_1 , сек	$2.449 \cdot 10^{-7}$	$2.101 \cdot 10^{-7}$	$1.751 \cdot 10^{-7}$	$1.401 \cdot 10^{-7}$	$1.049 \cdot 10^{-7}$	$6.96 \cdot 10^{-8}$	$3.419 \cdot 10^{-8}$
x_i , мм	0.015	0.011	0.007151	0.004305	0.002178	0.000768	0.0000768
a_{zi} , мм	0.005	0.004212	0.003564	0.002846	0.002127	0.001409	0.0006913

Расчет тепловых потоков от работы деформации на плоскости сдвига q_p и от работы трения на задней поверхности q_{tp} для приведенных условий рассчитываются также, как и в [2], согласно следующих формул:

$$q_{\delta} = 52 \cdot \sigma_i, \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{сек}; \quad (7)$$

$$q_{t\delta} = 4.33 \cdot \sigma_i, \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{сек}, \quad (8)$$

где σ_i – интенсивность деформации на плоскости сдвига при скорости и степени деформации при шлифовании.

Значение σ_i для различных марок стали в зависимости от температуры можно получить из графиков, приведенных в [7]. При реализации расчета для рассматриваемого примера принимаем, что на шестом резе с толщиной среза меньше 1 мкм (см. табл.1) образования стружки не происходит. Зерно только скользит по поверхности заготовки. Поэтому принимаем, что на последнем шестом резе тепловой поток образуется только за счет трения задней поверхности зерна по поверхности заготовки и при этом значение координаты x_6 , которое по расчету (см. табл.1) равно 0,07 мкм, принимаем равным нулю. Таким образом, последнее седьмое зерно только скользит по поверхности готовой детали.

В [9] установлено, что тепловые потоки от работы деформации и трения распределяются равномерно между поверхностью заготовки и стружки с зерном, т.е. в тело заготовки идет $0,5 \cdot q_{\delta} = 26 \cdot \sigma_i$, $0,5 \cdot q_{t\delta} = 2,16 \cdot \sigma_i$. Для того, чтобы в бесконечном стержне для какой-то координаты x_i создать тепловой поток в обоих направлениях $0,5 \cdot q_{\delta}$ и $0,5 \cdot q_{t\delta}$ надо эти тепловые потоки удвоить, т.е. принимать тепловой поток от работы деформации равным $q_{\delta} = 52 \cdot \sigma_i$, а трения на задней поверхности зерна $q_{t\delta} = 4,33 \cdot \sigma_i$. Принято $\sigma_i = 250000 \text{ Н/м}^2$, соответствующее температуре стали равной $\approx 500 \text{ С}^0$.

Результаты расчета для описанных условий шлифования приведены на рис.1. Полученная зависимость $T(\tau)$ обращает внимание на то, что каждый рез начинается при температуре заготовки не выше 300 С^0 . Таким образом температура самоподогрева предыдущим зерном для резания последующим невысока и значительно отличается от ее значений в диапазоне $(500 \div 800) \text{ С}^0$ как отмечают в своих исследованиях Корчак С.Н. [7] и Островский В.И. [8]. Таким образом практически самоподогрева, который разупрочняет обрабатываемый материал при врезании в него очередного абразивного зерна не происходит, а наоборот материал заготовки при температуре $(200 \div 300) \text{ С}^0$ упрочняется. Второе, чем обращает на себя внимание зависимость $T(\tau)$ на рис.1, это высокой температурой от скольжения последнего зерна по поверхности готовой детали. Работа трения последнего зерна при скольжении по поверхности готовой детали вызывая небольшой тепловой поток обеспечивает высокий нагрев детали. Объясняется это тем, что определяется нагрев поверхность непосредственно в источнике тепла ($x_7=0$ см. табл.1) и достаточно продолжительным его действием. Это время $Tt=2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ получено делением величины площадки износа зерна $l=0,1 \text{ мм}$ на скорость резания 50 м/с . Такое время значительно больше времени работы деформации (времени τ_l см. табл.1), т.е. превышает пребывание плоскости сдвига на стержне. Поэтому очень важным параметром процесса шлифования является правильное определение величины теплового потока от трения задней поверхности зерна по поверхности заготовки. Последний, в свою очередь, зависит от нормальных напряжений на задней поверхности зерна и коэффициента трения электрокорунда по стали.

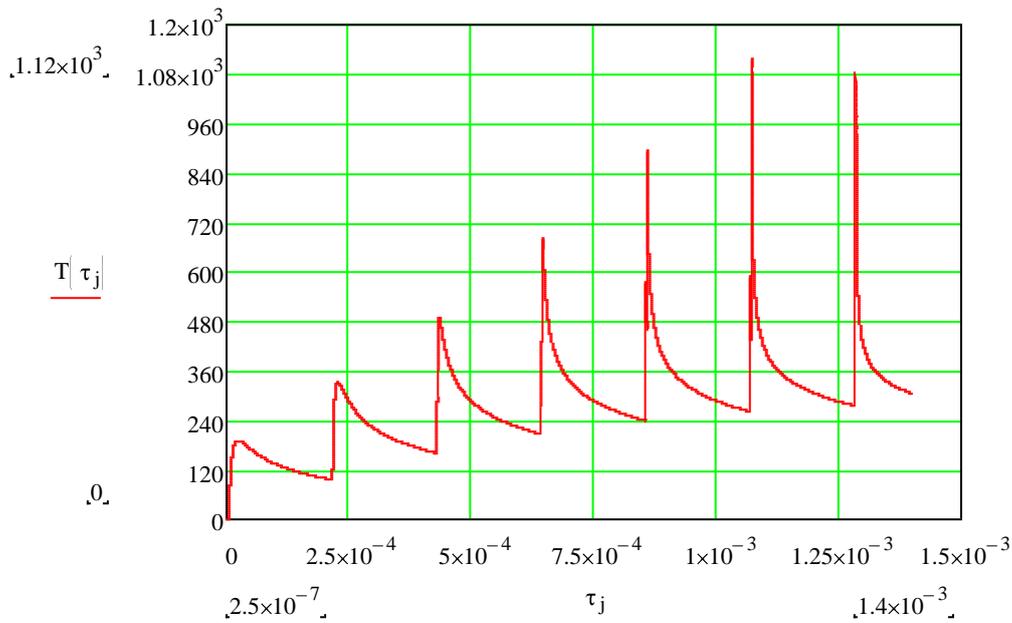


Рис. 1. Температура на шлифуемой поверхности детали из стали X18H10T при $\sigma_i=250000 \text{ Н/м}^2$. Расчет по аналитической модели (6).

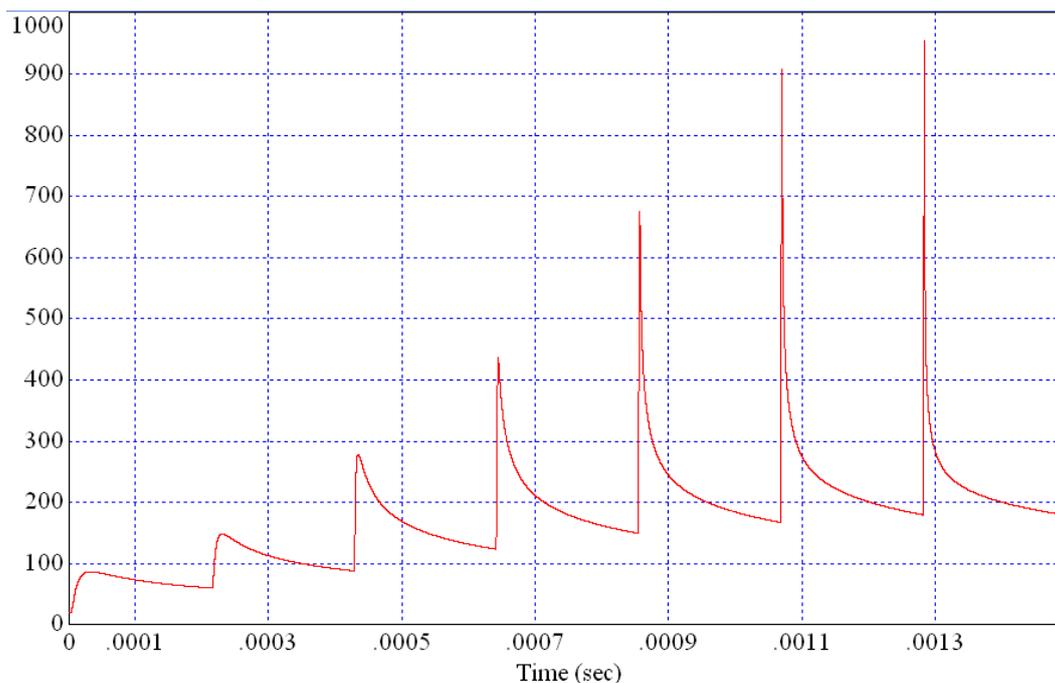


Рис. 2. Температура на шлифуемой поверхности детали из стали X18H10T с учетом зависимости $\sigma_i(\tau)$. Расчет по конечно-разностной модели.

Для тех же самых условий, для которых получена зависимость $T(\tau)$ на рис.1, выполнено моделирование нагрева при помощи конечно-разностной модели. Для этого использована модель, описанная в [1, 2], но с изменением размера конечного элемента с 0,25 мкм на 0,195 мкм. Поэтому весь стержень от координаты резания первым зерном $x_0=0,015 \text{ мм}$ до $x_T=0$ составляет 77 элементов. Результаты расчета по конечно-разностной модели приведены на рис. 2.

Отличие аналитической и конечно-разностной моделей, как отмечалось выше, состоит в том, что конечно-разностная модель учитывает изменение теп-

лофизических свойств обрабатываемого материала, а аналитическая нет. Сравнение графика $T(\tau)$ на рис.1 и рис.2 показывает, что аналитическая зависимость $T(\tau)$ (рис.1) дает более высокие мгновенные температуры.

Таким образом, хотя подогрева с разупрочнением от резания предыдущим зерном нет, имеет место самоподогрев и разупрочнение обрабатываемого материала самим режущим зерном для себя. Тепловой поток от работы деформации двигаясь вдоль стержня с высокой скоростью все таки прогревает впереди себя материал заготовки до температуры примерно равной $(800 \div 1000)C^0$, что показано в [6].

Учет самоподогрева при расчете по аналитической модели можно получить подбором σ_i для аналитической модели таким, чтобы зависимости $T(\tau)$ по аналитической и конечно-разностной модели были близки.

На рис. 3 приведена зависимость $T(\tau)$ при $\sigma_i = 200000 \text{ Н/м}^2$. Сравнение $T(\tau)$ рис.3 с $T(\tau)$ рис.2 показывает их близость. Так предпоследняя мгновенная температура на рис.3 равна 896 C^0 , а на рис.2 – 910 C^0 . Таким образом для аналитической модели, не учитывающей изменение σ_i от температуры, можно принимать значение σ_i , соответствующее значению его при $T=800 \text{ C}^0$ [7].

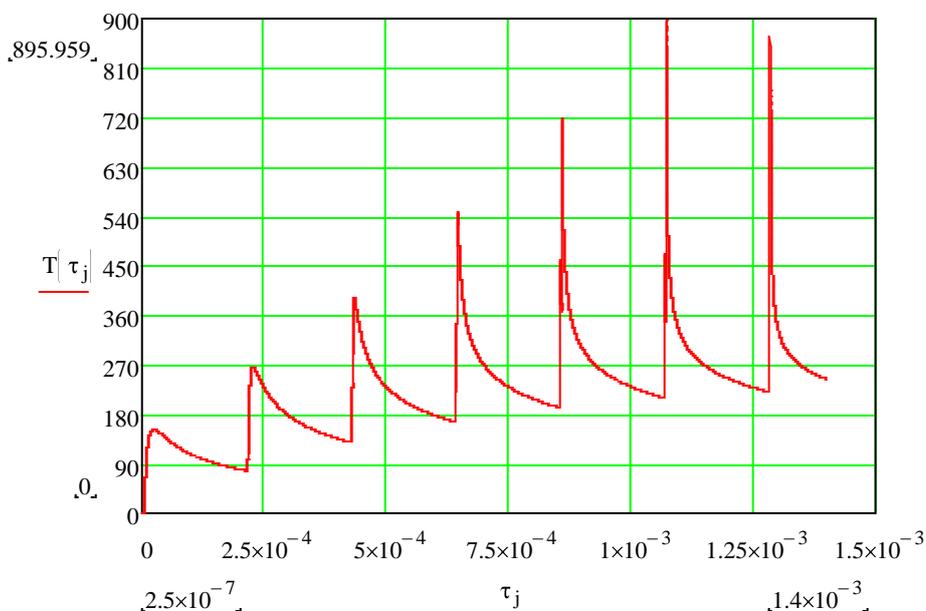


Рис. 3. Температура на шлифуемой поверхности детали из стали X18H10T при $\sigma_i = 200000 \text{ Н/м}^2$. Расчет по аналитической модели (6).

Выводы: 1. Установлено, что подогрев обрабатываемой поверхности, для рассмотренного примера, при резании абразивным зерном не разупрочняет поверхность при резании за ним следующим зерном. Такой нагрев не превышает 300 C^0 .

2. Установлено, что имеет место самоподогрев обрабатываемой поверхности и ее разупрочнение при резании абразивным зерном за счет распространения теплового потока от работы деформации впереди зерна, перемещающегося с большой скоростью.

3. Различие расчетов по аналитической и конечно-разностной моделям температуры поверхности позволяет косвенно оценить температуру самоподогрева впереди «бегущего» зерна для рассматриваемого примера равной примерно 800 C^0 .

Список литературы

1. Сизый Ю.А., Чайка Э.Г., Ушаков А.Н., Сталинский Д.В. Температура поверхности обработанной шлифованием как результат последовательного резания единичными абразивными зернами // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ"ХПИ", 2010. – Вып. 78. – С. 140-156.
2. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Теплофизика массового резания абразивными зернами шлифовального круга. // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2010. – №41. – С. 46-70.
3. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Расчет параметров процесса резания единичными абразивными зернами шлифовального круга при стержневой модели обрабатываемой поверхности // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2010. – №25. – С. 59-66.
4. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Конечно-разностная теплофизическая модель резания абразивными зернами шлифовального круга // Физические и компьютерные технологии. – Труды 15-й Междунар. научн.-техн. конф. 1-3 декабря 2009 г. – Харьков: ХНПК "ФЭД". – 2009. – С.145-154.
5. Сизый Ю.А., Волкова Н.Н., Савченко Э.В. и др. Нагрев диска при фрикционной разрезке проката // Известия вузов. Машиностроение, 1987, №1. – С. 111-115.
6. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. О мгновенной температуре шлифования // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2009. – №2. – С. 97-106.
7. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
8. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 141 с.
9. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. О балансе тепла от работы деформации на плоскости сдвига при резании единичным абразивным зерном // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування машинознавство. – Випуск 7 (166). – С. 65-75.

Анотація

Температура різання абразивними зернами при шліфуванні

У статті запропоноване аналітичне рішення задачі послідовного різання абразивними зернами слід у слід один одному при шліфуванні. Це рішення на прикладі рівняється з моделюванням методом кінцевих різниць

Abstract

Temperature of cutting with abrasive grains at polishing

In this article the analytic solution task of cutting abrasive grains go one after are considered. This solution are comparing with the finite-difference model