

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ В НЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЛИ СТОКОВ ТЕПЛА

Цокур А.К., Гаврилов В.Г., Цокур В.П.

(Запорожский НТУ, ДонНТУ, г. Запорожье, г. Донецк, Украина)

Введение

В зоне контакта рабочей поверхности шлифовального круга и обрабатываемой поверхности происходят сложные физико-химические процессы, зависящие от множества факторов и приводящие к изменению свойств поверхности обработанной детали [1-3].

Исследование влияния режимов резания на стойкость шлифовальных кругов и качество обработанной поверхности [1] позволяют дать рекомендации только для определенных условий. Теоретические исследования явлений в зоне контакта рабочей поверхности шлифовального круга и детали позволяют расширить количество изучаемых факторов, а применение вычислительной техники дает возможность получить более достоверные рекомендации.

Значимость тех или иных факторов зависит от мощности теплового источника в зоне контакта, который определяет температуру в зоне резания и вызывает протекание специфических физико-химических процессов. Наличие в зоне контакта веществ, способных создавать условия для протекания процессов с поглощением или выделением тепла позволяет создавать условия обеспечения необходимого качества обработанной поверхности. Цель данной работы – исследовать температурные поля в абразивном диске.

Основное содержание работы

Исследовать температурные поля в зоне контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью можно различными методами. В данной работе расчет нестационарных температурных полей в абразивном диске велся на основе математической модели, предложенной авторами в работе [1]. Схема, на которой показаны поверхности абразивного диска и зона физико-химических процессов, приведена на рис. 1.

На небольшом участке периферийной поверхности быстровращающегося абразивного диска действует тепловой источник, а остальная его часть охлаждается путем конвективного теплообмена. В окрестности рабочей (периферийной) поверхности Γ_2 инструмента при нагреве происходят физико-химические процессы, сопровождающиеся выделением или поглощением тепла. Мощность распределенных источников или стоков тепла в момент времени t моделировалась слагаемым

$$H \cdot \frac{\partial V}{\partial t},$$

где H – энтальпия физико-химических процессов;

V – концентрация реагента в весовых долях.

Типичный вид зависимости величины концентрации реагента V от температуры T дается выражением (1)

$$V = \begin{cases} V_s, T \leq T_s, \\ ((V_s - V_F)/(T_F - T_s)) \cdot (T_s - T) + V_s, T_s \leq T \leq T_F, \\ V_F, T \geq T_F \end{cases} \quad (1)$$

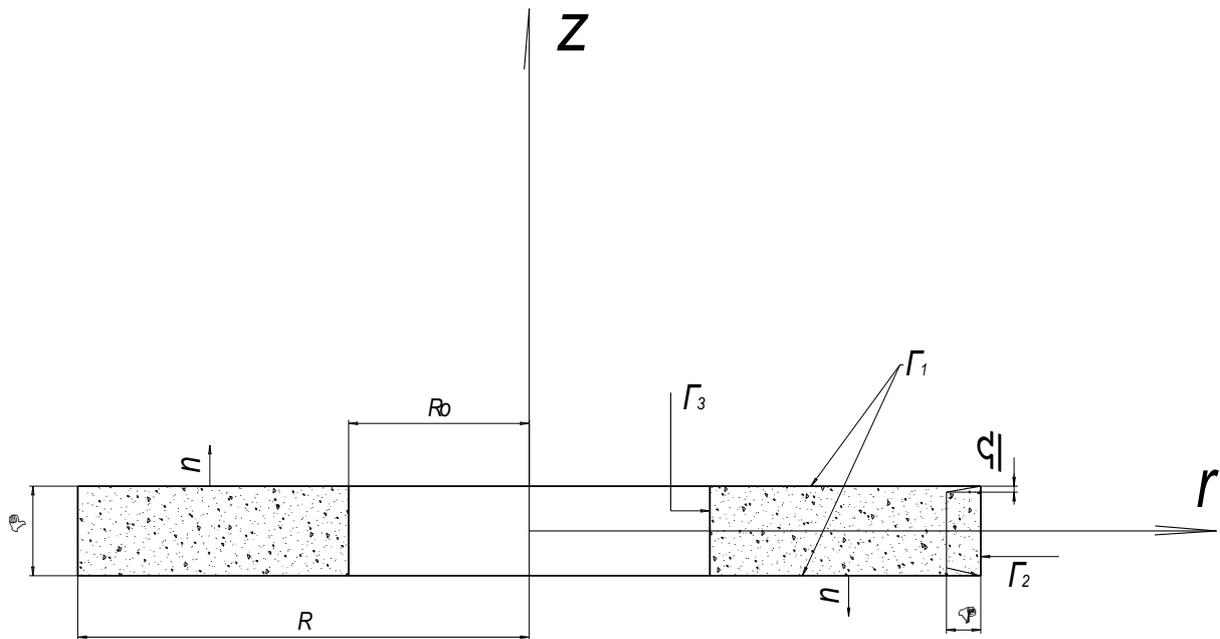


Рис.1. Схема абразивного диска

n – вектор единичной внешней нормали к поверхности Γ_1 ; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ – поверхности, ограничивающие абразивный круг; $\Delta \times \Delta r$ – зона физико-химических процессов

Так как диск вращается, то все точки периферийной поверхности будут последовательно проходить через этапы нагрева и охлаждения, т.е. все эти точки будут находиться в одинаковых температурных условиях. Таким образом, задачу можно считать осесимметричной. Примем при этом, что зависимость температуры точек периферии от времени описывается функцией $f(t)$

$$f(t) = \begin{cases} a \cdot t^2 + b \cdot t + \tilde{C}, & 0 \leq t \leq t_0, \\ T_y, & t \geq t_0, \end{cases}$$

где t_0 – промежуток времени, через который процесс нагревания входит в стационарное состояние;

T_y – температура рабочей поверхности на фиксированном уровне через время t_0 .

Присоединяя к уравнению теплопроводности, записанному в цилиндрических координатах r, φ, Z , соответствующие начальные и граничные условия (смотри [1]), приходим к следующей математической модели процесса нагрева абразивного диска:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + H \cdot \frac{\partial V}{\partial t}, t > 0, R_0 \leq r \leq R, -\frac{\Delta}{2} \leq Z \leq \frac{\Delta}{2}, \quad (2.1)$$

$$T = f(t), r = R, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha \cdot (T - T_\infty), Z = \pm \frac{\Delta}{2}, \quad (2.3)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = R_0 \cdot \hat{c} \cdot \hat{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, r = R_0, \quad (2.4)$$

$$T = T_0, R_0 \leq r \leq R, -\frac{\Delta}{2} \leq Z \leq \frac{\Delta}{2}, t = 0 \quad (2.5)$$

где $c \cdot \rho$, $\hat{c} \cdot \hat{\rho}$, λ , α – соответственно, удельная теплоемкость диска, удельная теплоемкость материала шпинделя, теплопроводность диска, коэффициент теплоотдачи на границе инструмент - охлаждающая среда. Смысл других величин, входящих в граничные условия (2.2)-(2.4), ясен из рис. 1.

При этих условиях необходимо найти поле температур в диске в различные моменты времени и оценить влияние на это поле таких параметров, как $\alpha, V_s, V_F, T_s, T_F$.

Численные расчеты на основе модели (2.1)-(2.5) проводились при помощи разработанного авторами универсального программного комплекса. Его основу составляет метод конечных элементов (МКЭ) [4, 5]. Комплекс предназначен для нахождения различных физических полей в сплошных средах и состоит из двух подкомплексов:

- 1) препроцессора PREFEM, осуществляющего автоматическую разбивку рассматриваемой области сплошной среды на конечные элементы;
- 2) подкомплекса ARTISAN, решающего систему уравнений МКЭ.

В силу очевидных симметрий задачи (2.1)-(2.5) расчеты ограничивались областью

$$R_0 \leq r \leq R, 0 \leq Z \leq \frac{\Delta}{2}.$$

Задача решалась в интервале времени $0 \leq t \leq t_0$, т.е. рассчитывался переходный процесс, когда температура рабочей поверхности диска монотонно возрастает от начальной T_0 до некоторой установившейся T_y . При этом принималось следующее предположение: в окрестности периферийной поверхности Γ_2 формируется узкая зона физико-химических превращений; в дальнейшем она, не меняя размеров, движется к оси диска по мере его механического износа, причем рабочая поверхность Γ_2 (см. рис. 1) образует задний фронт зоны.

Область (3) разбивалась на 210 линейных треугольных конечных элементов. Соответствующая сетка конечных элементов содержала 128 узлов, причем в окрестности поверхности Γ_2 она существенно сгущалась, т.к. вблизи периферии имеется большой градиент температуры.

Расчеты велись на ПЭВМ. Входные параметры принимали следующие значения

$$\lambda = 4 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}), c = 400 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}), \rho = 2.8 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$\hat{c} = 452 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}), \hat{\rho} = 7.87 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3; H = 6.1 \cdot 10^9, 10^{10}, 2 \cdot 10^{10} \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

$$1) \alpha = 200, 300, 500 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}); T_\infty = T_0 = 293^0 \text{ К}, T_s = 623^0 \text{ К},$$

$$T_F = 773^0 \text{ К}, T_y = 914.25^0 \text{ К}; V_s = 20\%, 15\%, 10\%, 3\%, 0\%;$$

$$V_F = 3\%, 0\%, \Delta = 40 \text{ мм}, 50 \text{ мм}, 60 \text{ мм}, 70 \text{ мм}; R = 250 \text{ мм}, R_0 = 100 \text{ мм}; t_0 = 8c;$$

$$2) a = -8.4375, b = 141.625, \tilde{c} = 321.75.$$

Расчеты подтвердили предположение о наличии зоны физико-химических превращений в окрестности периферийной поверхности, а также дали возможность определить форму этой зоны (на рис. 1 она изображена заштрихованной равнобедренной трапецией; $\delta = 5 \text{ мм}; \Delta r = 3 \text{ мм}$). Расчеты показали, что глубина зоны Δr зависит от крутизны K кривой $V = V(T)$:

$$K = (V_s - V_F) / (T_F - T_s)$$

и от величины энтальпии H - с увеличением K (или H) Δr убывает.

При отношении Δ к R , находящемся в пределах $0.16 \leq \frac{\Delta}{R} \leq 0.28$, распределение температуры по толщине диска почти постоянно за исключением тонкого слоя в окрестности поверхности Γ_1 .

Наличие реагента приводит к тому, что скорость возрастания температуры в окрестности рабочей поверхности диска уменьшается. Например, для кривой $V = V(T)$ с крутизной $K = (10 - 3)/(773 - 623) = 0.046$ это уменьшение составляет 25%, а для той же кривой, но с крутизной $K = (3 - 0)/(773 - 623) = 0.02$ это уменьшение составляет 20%.

На рис. 2 показаны кривые радиального распределения температуры; при отсутствии реагента в окрестности рабочей поверхности распределение температуры в момент времени $t = 8$ с изображается кривой № 5.

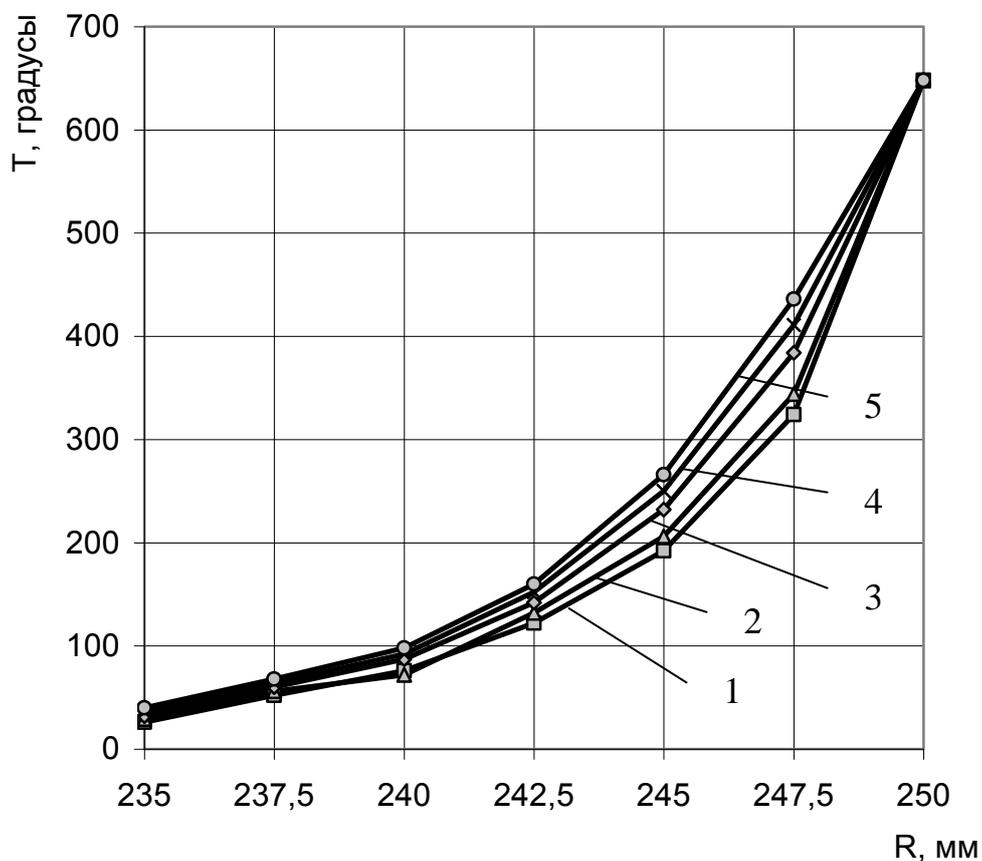


Рис. 2. Радиальные распределения температур в момент времени 8 с (распределенные стоки тепла): для кривых 1-5 соответственно, $V_S = 15\%$, $V_F = 3\%$; $V_S = 10\%$, $V_F = 3\%$; $V_S = 3\%$, $V_F = 0\%$; $V_S = 1\%$, $V_F = 0\%$; $V_S = V_F = 0\%$

Кривые 1-4 соответствуют следующим начальным и конечным концентрациям реагента: кривая № 1: $V_S = 15\%$, $V_F = 3\%$; кривая № 2: $V_S = 10\%$, $V_F = 3\%$; кривая № 3: $V_S = 3\%$, $V_F = 0\%$; кривая № 4: $V_S = 1\%$, $V_F = 0\%$.

Как видно по рис. 2, наличие распределенных стоков тепла приводит к тому, что в зоне физико-химических превращений происходит некоторое понижение рабочей температуры примерно на 100°K .

Более того, понижение температур происходит и в окрестности зоны на глубине примерно 10 мм (вдоль радиуса). Среднее относительное уменьшение температуры $\langle \Delta T / T \rangle$ оказалось зависящим от крутизны K кривой $V = V(T)$ и от энтальпии H . На рис.3 показан график зависимости $\langle \Delta T / T \rangle$ от ΔV .

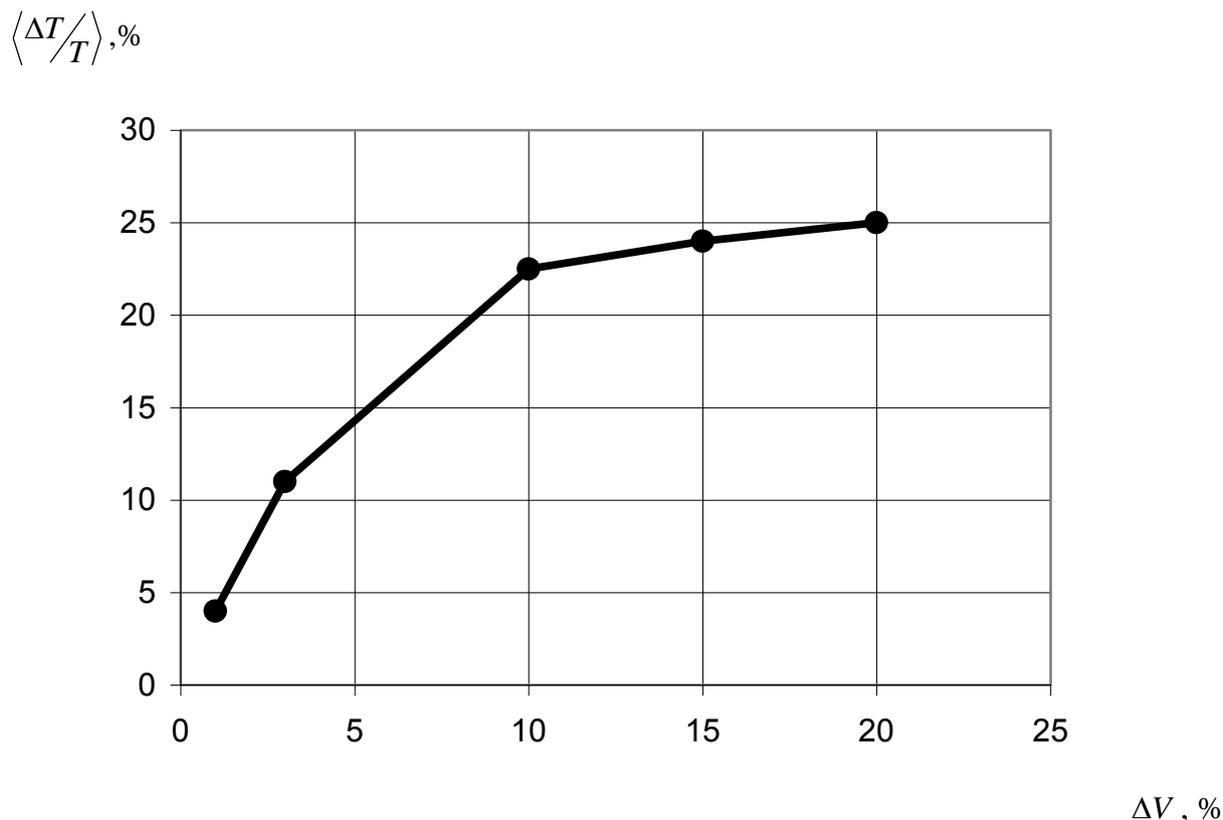


Рис. 3. Зависимость среднего относительного изменения температуры от перепада концентраций $\Delta V = V_S - V_F$

Видно, что кривая имеет четко выраженный участок насыщения. Точка насыщения соответствует значению крутизны $K \approx 0.08$. Дальнейшее увеличение ΔV не приводит к увеличению эффекта понижения рабочей температуры. Аналогично ведет себя и зависимость $\langle \Delta T / T \rangle$ от H . В противоположность этому, наличие распределенных источников тепла приводит к резкому увеличению температуры в окрестности поверхности Γ_2 примерно на 650°K .

На рис. 4 показаны графики зависимости температуры T от радиальной координаты r в момент времени $t = 8\text{c}$.

Кривая № 2 соответствует случаю наличия в абразивном диске распределенных источников тепла с параметрами

$$V_s = 10\%, V_F = 3\%, \quad H = 6.1 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3, \quad T_s = 623^0 \text{ К}, T_F = 773^0 \text{ К},$$

а кривая № 1 – случаю их отсутствия. Как и выше, в окрестности периферии возникает зона физико-химических превращений. Изменяются не только ее размеры: глубина увеличивается примерно в 3 раза ($\Delta r \approx 9$ мм, а $\delta \approx 2$ мм). Кроме того, результаты расчетов показали, что тип граничных условий на поверхности Γ_1 (1-го или 3-го рода), при отношении поперечного размера диска к радиальному, находящемуся в пределах $[0,16 \dots 0,28]$, не оказывает существенного влияния на температурное поле. Заметные отличия имеют место лишь в тонком слое, примыкающем к поверхности Γ_1 . Его толщина равна примерно 5 мм. Результаты, полученные при $\alpha = 200, 300, 500 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ практически совпадают. При расчете К для $\alpha = 200, 300, 500 \text{ Вт/м}^2$ результаты практически совпадают.

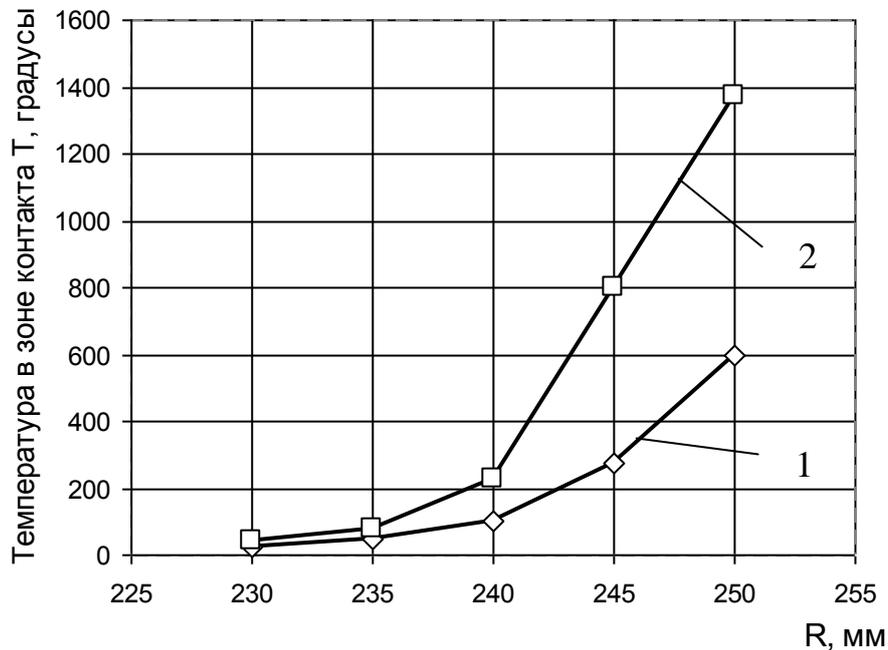


Рис. 4. Радиальное распределение температур в момент времени $t = 8$ с (распределенные источники тепла): для кривой 1 – $V_s = V_F = 0\%$; для кривой 2 – $V_s = 10\%$, $V_F = 3\%$

Выводы

1. В окрестности рабочей поверхности абразивного диска в процессе шлифования возникает тонкая область физико-химических превращений глубиной примерно 2,5-3 мм в случае распределенных стоков тепла, и 9-10 мм – в случае распределенных источников тепла.

2. Наличие такой области приводит к эффекту понижения температуры в окрестности периферии (в случае действия стоков тепла) примерно на 100^0 , либо к эффекту резкого повышения температуры в несколько большей окрестности (в случае присутствия источников тепла) примерно на 600^0 ; посредством соответствующего подбора таких параметров реагента, как V_s, V_F, T_s, T_F, H можно добиться максимизации или минимизации этого эффекта.

3. При соотношении геометрических размеров абразивного диска, находящемся в пределах $0.16 \leq \frac{\Delta}{R} \leq 0.28$, тип граничного условия на Γ_1 , а также величина коэффициента теплоотдачи α в интервале от 200 до 500 Вт/м² К не оказывают существенного влияния на распределение температуры.

4. При $0.16 \leq \frac{\Delta}{R} \leq 0.28$ распределение температуры по толщине диска почти постоянно за исключением тонкого слоя в окрестности поверхности Γ_1 глубиной примерно 5 мм.

Список литературы 1. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 359 с. **2.** Цокур А.К., Цокур А.Я., Гаврилов В.Г. Математическое моделирование процессов теплопроводности в абразивном инструменте при наличии в нем физико-химических превращений // Инженерно-физический журнал. – 1995. – Т.68. – №2. – С. 306-311. **3.** Цокур А.К., Цокур А.Я., Драевский А.И. Температурные поля в абразивном инструменте // Инженерно-физический журнал. – 1989. – Т. 56. – №6. – С. 1008-1013. **4.** Ящерицын П.И., Цокур А.К., Драевский А.И. Химические явления в процессе шлифования // Известия АН БССР. Сер. физико-технических наук. – 1986. – №2. – С. 43-49. **5.** Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 396 с. **6.** Зенкевич О. Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В АБРАЗИВНОМУ ІНСТРУМЕНТІ З УРАХУВАННЯМ ДІЇ В НЬОМУ РОЗПОДІЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ АБО СТОКІВ ТЕПЛА

Цокур А.К., Гаврилов В.Г., Цокур В.П.

Наведені результати розрахунків нестационарних температурних полів в абразивному інструменті. В основу розрахунків покладена двохмірна математична модель розповсюдження тепла. Ядром алгоритму чисельного рішення заданої задачі є метод кінцевих елементів, який був реалізований у вигляді програмного комплексу з препроцесора та вирішувача.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ В НЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЛИ СТОКОВ ТЕПЛА

Цокур А.К., Гаврилов В.Г., Цокур В.П.

Приведены результаты расчетов нестационарных температурных полей в абразивном инструменте. В основу расчетов положена двумерная математическая модель распространения тепла. Ядро алгоритма численного решения поставленной задачи составил метод конечных элементов, реализованный в виде программного комплекса, состоящего из препроцессора и решателя.

NUMERICAL RESEARCH OF NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELDS
IN THE ABRASIVE TOOL IN VIEW OF ACTION OF THE DISTRIBUTED
SOURCES OR DRAINS OF HEAT

Tsokur A.K., Gavrilov V.G., Tsokur V.P.

Results of calculations of non-stationary temperature fields in the abrasive tool are resulted. The bidimensional mathematical model of distribution of heat is put in the basis of calculations. The core of algorithm of the numerical decision of a task in view was made with the method of final elements realized as a program complex, consisting of a preprocessor and solver.

Рецензент: д.т.н., проф. Малишко І.О.