

2. Внедрение в производство индустриальных почвообрабатывающих посевных комплексов снижает уровень металлоемкости на гектар посевной площади в 2,1-2,4 раза, а применение энергосберегающих комплексов – в 5-6 раз в сравнении с серийным почвообрабатывающим посевным комплексом.

3. Внедрение в производство энергосберегающих и индустриальных комплексов будет сопровождаться существенным высвобождением рабочих, поэтому руководителям агропредприятий необходимо готовить такие программы, которые бы позволили их трудоустроить.

#### Библиографический список

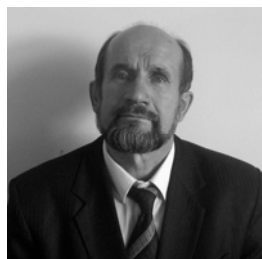
1. Беляев В.И. Тяговые испытания и агротехническая оценка посевных машин

при различных скоростных режимах работы / В.И. Беляев, И.И. Бауэр, Ю.С. Зыга // Вестник АГАУ. – 2008. – № 3.

2. Завора В.А. К вопросу обоснования продолжительности выполнения механизированных работ в растениеводстве / В.А. Завора, В.И. Толокольников // Вестник АГАУ. – 2007. – № 1.

3. Завора В.А. Машинно-технологические станции и их технологическое обеспечение / В.А. Завора // Вестник ЧГАУ. – 2004. – Т. 42.

4. Завора В.А. Современное состояние и основные пути развития механизации растениеводства АПК / В.А. Завора, В.И. Толокольников, С.Н. Васильев // Вестник АГАУ. – 2008. – № 3. – С. 43-50.



УДК 631.3.01.004.67

**В.П. Шерышев,  
В.Н. Чижов,  
А.А. Болтенков,  
М.В. Селивёрстов**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

**Ключевые слова:** *электроконтактная термомеханическая обработка, деталь типа «диск», угловая скорость, режущая кромка, восстановление, теплообмен, температура, математическая модель, численный эксперимент.*

#### Введение

Режущая кромка рабочих органов почвообрабатывающих машин, взаимодействуя с почвой, интенсивно изнашивается,

теряя свои режущие свойства. Обширную группу быстроизнашивающихся рабочих органов сельскохозяйственных почвообрабатывающих машин представляют собой детали типа «диск». Одним из перспективных способов восстановления их режущей способности является разрабатываемая в Алтайском ГАУ электроконтактная термомеханическая обработка (ЭТМО) [1].

Основными технологическими параметрами ЭТМО являются: напряжение  $U$ , сила тока  $I$  и давление  $P$ , прикладываемые к формирующему электроду, угловая скорость вращения  $\omega$  восстанавливаемой детали типа «диск», определяющая производительность процесса восстановления. Придать заостренную форму режущей кромке можно и на холодной детали, имеющей температуру окружающей среды. Однако при этом придется прикладывать к электроду большую механическую нагрузку  $P$ .

С другой стороны, известно, что металл детали, нагретый до температуры превосходящей температуру пластической деформации при данном давлении, оказывает значительно меньшее сопротивление процессу деформирования. В связи с этим возникает задача определения рационального сочетания величины прикладываемого в зоне деформирования давления  $P$ , силы тока  $I$  и напряжения  $U$ , обеспечивающих нагрев каждой точки объема металла восстанавливаемой режущей кромки, находящегося под формирующим электродом, до температуры пластической деформации  $T_{ДЕФ}$ .

При этом первостепенную роль играет распределение температуры. В пространственно-одномерном случае закон распределения температуры по сечению системы «деталь-теплоотводящая масса»  $\theta(x)$  определяется по заданным  $P$  и  $U$  с помощью численного моделирования, представленного в работе [2].

Следующим этапом решения задачи определения параметров ЭТМО является определение угловой скорости  $\omega$ . Этому вопросу и посвящена данная работа.

**Постановка задачи.** Рассмотрим схематическое изображение процесса ЭТМО (рис. 1). Деталь 2 толщиной  $l_2$  (сталь 65Г), жестко прикрепленная к вспомогательной теплоотводящей массе 3, выполненной также в виде диска толщиной  $l_3$  (сталь 3), с угловой скоростью  $\omega$  вращается под формирующим электродом 1 (твердый сплав Т15К6), к которому приложены напряжение  $U$  и давление  $P$  ( $r_1$  – радиус цилиндрической части сечения детали;  $r_2$  – радиус конической части сечения детали до конечной части затупленной кромки;  $r_3$  – радиус теплоотводящей массы;  $r$  – средний радиус зоны деформирования;  $l_1$  – длина электрода).

Выделим на поверхности обрабатываемой детали окружность радиуса  $r_0$  и мысленно пронизем систему «деталь-теплоотводящая масса» в направлении, перпендикулярном к вышеуказанной поверхности (рис. 1 а). Тогда получим составной стержень, состоящий из двух контактирующих стержней – из стали 65Г и Ст-3 (пунктирная область) (рис. 1 б). В первом приближении этот стержень будем считать однородным стержнем длиной  $l = l_2 + l_3$  с некоторыми усредненными теплофизическими характеристиками.

Считаем, что выделенный условный стержень, двигаясь по окружности (пунктирная линия) через боковую поверхность площади  $S_1 = 2\pi r l$ , нагревается до заданной температуры, распределенной по закону  $\theta(x)$  (рис. 1 а). Теплообмен стержня с окружающей средой осуществляется через его торцы.

Температурное поле рассматриваемого стержня  $T(x, t)$  ( $x$  – координата,  $t$  – время) представим уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \eta(t)(\theta(x) - T),$$

$$0 < x < l, t > 0, \quad (1)$$

где  $a^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  – температуропроводность,  $m^2/c$ ;

$\lambda$  – среднее значение теплопроводности, Вт/(м·К);

$c$  – среднее значение удельной массовой теплоемкости, Дж/(кг·К);

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta(t)$  – коэффициент кондуктивного теплообмена стержня с окружающей массой материала детали (определяется данными предварительных экспериментальных исследований),  $c^{-1}$ .

Теплообмен условно выделенного стержня, осуществляемый с его торцов с окружающей средой, регламентируется законом Ньютона, то есть:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \bar{\alpha}(t) \cdot (T_{cp} - T),$$

$$x = 0, t > 0, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \bar{\alpha}(t) \cdot (T - T_{cp}),$$

$$x = l, t > 0, \quad (3)$$

где  $\bar{\alpha}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>К).

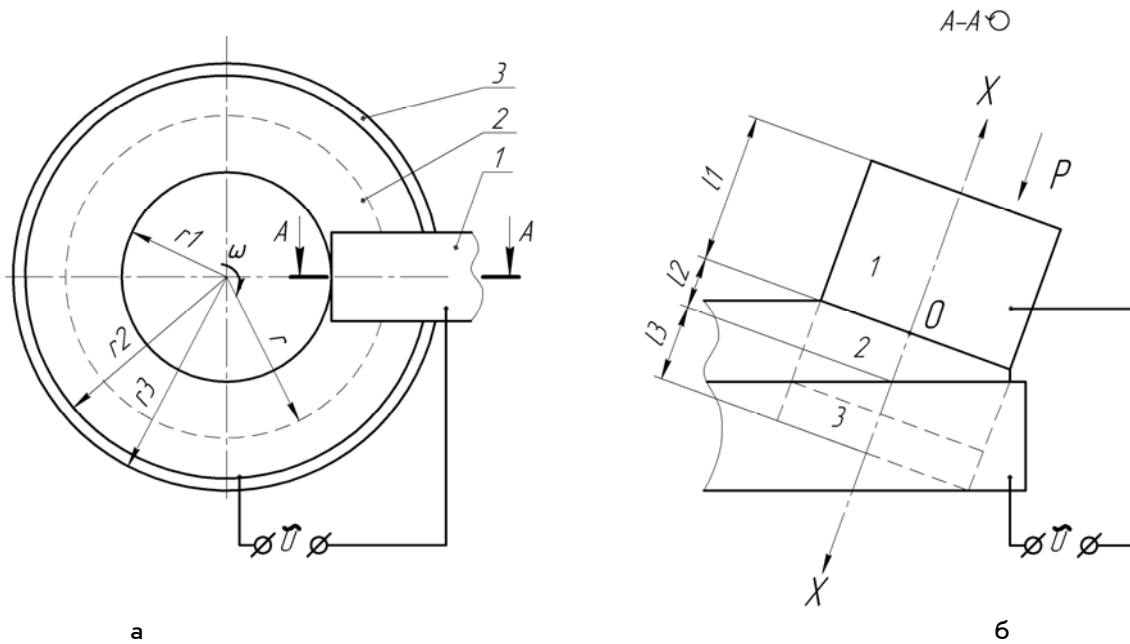


Рис. 1. Схематизация процесса ЭТМО: а – вид сверху; б – поперечное сечение

К моменту начала процесса ЭТМО стержень равномерно нагрет до температуры окружающей среды ( $T_{cp}$ ):

$$T|_{t=0} = T_{cp}, \quad 0 \leq x \leq l; \quad t = 0. \quad (4)$$

Требуется определить время  $t_{max}$ , за которое точка стержня с координатой  $x = l_2$  достигнет температуры пластической деформации  $T_{ДЕФ}$ . Таким образом будет определена и угловая скорость.

**Метод решения.**

Задачи (1)-(4) будем решать методом конечных разностей. Перейдем от непрерывной области измерения аргументов  $G = \{(x, t): 0 \leq x \leq l; 0 \leq t \leq t_{max}\}$  к сеточной области  $G^h = \{(x_i, t^k): 0 \leq i \leq N; 0 \leq k \leq m; t^k = k \cdot \tau\}$ , где  $h$  – шаг сетки по переменной  $x$ ,  $m$ ;  $\tau$  – шаг сетки по переменной  $t$ , с.

После замены в уравнениях (1)-(4) частных производных отношениями конечных разностей для определения сеточной функции  $U_i^k$ , определенной в узлах сеточной области  $G^h$ , получаем систему разностных уравнений:

$$-a \cdot U_{i+1}^{k+1} + b^k \cdot U_i^{k+1} - c \cdot U_{i-1}^{k+1} = d_i^k, \quad (5)$$

где  $a = c = \frac{\alpha^2 \cdot \tau}{h^2}$ ;  $b^k = 1 + \frac{2 \cdot \alpha^2 \cdot \tau}{h^2} + \tau \cdot \eta^k$ ;

$$d_i^k = U_i^k + \tau \cdot \eta^k \cdot \theta_i;$$

$\eta^k$  – значение функции  $\eta$  на  $k$ -том слое по времени;

$\theta_i$  – значение функции  $\theta$  в  $i$ -том узле сетки.

С помощью метода прогонки [3] получаем расчетные формулы.

Прямая прогонка:

$$\alpha_i = \frac{a}{b - c \cdot \alpha_{i-1}}; \quad \beta_i = \frac{d_i^k + c \cdot \beta_{i-1}}{b - c \cdot \alpha_{i-1}}; \quad i = \overline{1, N-1}. \quad (6)$$

Обратная прогонка:

$$U_i^{k+1} = \alpha_i \cdot U_{i+1}^{k+1} + \beta_i; \quad i = \overline{N-1, 0}, \quad (7)$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – прогоночные коэффициенты.

Начальные значения прогоночных коэффициентов определяются по формулам:

$$\alpha_0 = \frac{1}{1 + \zeta^k}; \quad \beta_0 = \frac{\zeta^k \cdot T_{cp}}{1 + \zeta^k}; \quad \zeta^k = \frac{\bar{\alpha}^k \cdot h}{\lambda}. \quad (8)$$

Начальное значение для выполнения обратных прогонок вычисляется по формуле:

$$U_N^{k+1} = \frac{\zeta^k \cdot T_{cp} + \beta_{N-1}}{1 + \zeta^k - \alpha_{N-1}}. \quad (9)$$

**Численный эксперимент.** По приведенной выше математической модели для определения параметров электроконтактного термомеханического деформирования в системе «деталь-теплоотводящая масса» был проведен численный экспери-

мент. Целью этого эксперимента являлось определение времени достижения точкой  $x = l_2$  температуры начала пластического деформирования при заданном давлении  $P$ .

В среде MATHCAD с использованием полученной математической модели и метода прогонки была составлена программа.

Исходными данными для проведения численного эксперимента являлись среднее значение теплопроводности  $\lambda = 35,96$  Вт/(м·К), среднее значение удельной массовой теплоемкости  $c = 1390$  Дж/(кг·К), плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. В качестве начальной температуры процесса принята температура окружающей среды  $T_{cp} = 20^\circ\text{C}$ .

В начальной стадии проведения численного эксперимента были определены коэффициенты  $a$ ,  $b^k$ ,  $c$  и  $d_i^k$  для каждого слоя сетки по времени.

Далее производились вычисления начальных значений прогоночных коэффициентов  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  и  $\zeta^k$ , а также выполнялись прямые и обратные прогонки для каждого временного слоя.

### Результаты и их обсуждение

В результате эксперимента прослежено распределение температур по толщине системы «деталь-теплоотводящая масса» во времени (рис. 2).

Как было отмечено ранее, детали, нагретые до температуры пластической деформации, оказывают значительно мень-

шее сопротивление пластическому деформированию. Следовательно, на рисунке 2 необходимо выбрать такой диапазон температур, который позволит не только уменьшить сопротивление пластическому деформированию и тем самым быстро восстановить геометрические параметры режущей кромки диска, но и обеспечит сохранение, а возможно, и увеличение других качественных характеристик режущей кромки.

Данные рисунка 2 свидетельствуют о том, что повышение температуры металла при нагреве может оказывать существенное влияние как на сопротивление деформированию, так и на его служебные механические характеристики. О ходе изменения прочности и пластичности в зависимости от увеличения температуры нагрева можно судить по зависимостям, приведенным на рисунке 3 [4], которые наглядно демонстрируют, что нагрев углеродистой стали до  $100^\circ\text{C}$  несколько увеличивает пластичность и уменьшает сопротивление деформированию. Дальнейшее увеличение температуры до  $300^\circ\text{C}$  значительно уменьшает пластичность и увеличивает прочность (зона синеломкости). Это может быть объяснено выпадением мельчайших частиц карбидов по плоскостям скольжения. Дальнейшее увеличение температуры приводит к постепенному, но значительному снижению прочности металла. При температурах порядка  $1000^\circ\text{C}$  предел прочности ( $\sigma_g$ ) уменьшается более чем в 10 раз.

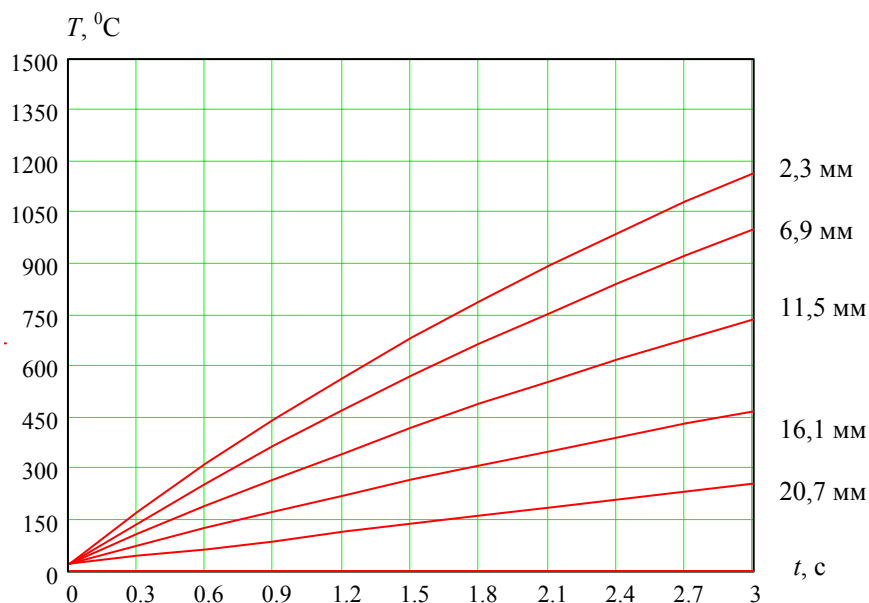


Рис. 2. Зависимость температуры от времени в фиксированных точках системы «деталь-теплоотводящая масса»

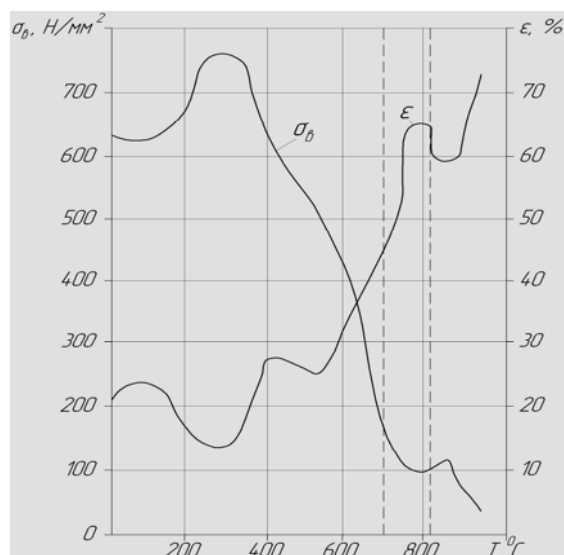


Рис. 3. График изменения показателей прочности ( $\sigma_0$ ) и степени деформации ( $\epsilon$ ) [4]

Для показателя степени деформации ( $\epsilon$ ) характерна более низкая область температур, при которых возможна хотя бы неполная горячая деформация.

При температуре 830-900°C получили резкое снижение пластичности, происходящее, по их мнению, в результате значительного роста зерна.

Следовательно, искомый диапазон температур будет составлять от 700 до 820°C так как деформирование при данных температурах не встретит значительного сопротивления и позволит получить качественные прочностные характеристики восстановленной режущей кромки.

Возвращаясь к данным, полученным путем численного эксперимента, можно

сказать, что данный диапазон температур в точке  $x = l_2$  будет достигнут через 1,5-1,9 с (рис. 2).

**Вывод**

Таким образом, разработанная в статье математическая модель позволяет определить время, необходимое для подготовки материала детали к пластическому деформированию, а, соответственно, зная геометрические параметры конкретного рабочего органа можно определить угловую скорость восстановления при прочих заданных параметрах процесса для его режущей кромки.

**Библиографический список**

1. Чижов В.Н. Восстановление дисков сошников сеялок с использованием метода электроконтактного нагрева / В.Н. Чижов, А.В. Бодякин, М.В. Селивёрстов // Продукция предприятий Алтайского края для АПК России: сб. – Барнаул, 2003. – С. 67-68.
2. Чижов В.Н. Математическое моделирование тепловых процессов в системе «электрод – деталь – теплоотводящая масса» при ремонте деталей / В.Н. Чижов, А.А. Болтенков, Ф.С. Телгожаева // Вестник АГАУ. – 2009. – № 12 (62). – С. 80-84.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 592 с.
4. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.



УДК 539.211

**А.С. Баранов,  
А.С. Павлюк**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА  
СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

**Ключевые слова:** поверхность тела, координаты центра метки, анализ измерений, моделирование поверхности, форма тела.

**Введение**

Точное описание поверхности кузовных деталей мобильной машины, а также ра-

бочей поверхности рабочих органов сельскохозяйственных машин необходимо при их конструировании и изготовлении, но вызывает определенную сложность. Вследствие этого предпринимались попытки упростить процесс определения формы рабочей поверхности с помощью ряда способов.