

**Л.А. Лопата, канд. техн. наук, доц.**

*Национальный авиационный университет, Киев*

**Ю.В. Волков ст. преподаватель**

*Одесская национальная морская академия*

**А.В. Татаров, доц., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет*

**М.А. Писковая, инженер**

*Кировоградский государственный педагогический университет В. Винниченко*

## Математическое моделирование распространения тепла при электроконтактном припекании

В предлагаемой статье показано, что характер протекания диффузионных процессов при припекании зависит от уровня температуры, ее распределения по слою и детали, скорости нагрева и охлаждения и обуславливает уровень остаточных напряжений в покрытии и в детали, оказывает влияние на формирование эксплуатационных свойств наносимых покрытий. В связи с этим получение качественного покрытия возможно только при поддержании необходимого соотношения между температурой процесса (силой тока, продолжительностью импульсов и пауз) и величиной прикладываемого давления. С этой целью было выполнено математическое моделирование распространения тепла при электроконтактном припекании.

**электроконтактное припекание, температурные поля, математическое моделирование, численное решение**

**Введение.** Важную роль при выборе рациональных технологических параметров процесса электроконтактного припекания покрытий играет возможность прогнозирования температурных полей в обрабатываемой детали и формируемом покрытии в зависимости от параметров режима и конструктивных особенностей детали и оборудования. Определение температурных полей и термических циклов в обрабатываемом изделии важно прежде всего тем, что позволяет оценить возникающие температурные напряжения, в том числе и на поверхности контакта между деталью и наносимым слоем, что является необходимым для оценки явлений, происходящих на границе основы с наносимым покрытием. В настоящее время, ввиду сложности и дороговизны экспериментального определения оптимальных параметров процесса напыления, наиболее эффективным методом прогнозирования пространственно-временного распределения температур в рассматриваемой системе, а также оптимизации процесса, является метод математического моделирования.

**Состояние проблемы.** Теоретическому исследованию температурных полей при электроконтактном упрочнении посвящен ряд работ [1]. В данных работах были получены некоторые аналитические решения поставленной задачи, однако это было выполнено при ряде существенных упрощений. К таковым, прежде всего, следует отнести постоянство теплофизических характеристик материалов детали и наносимого слоя при изменении температуры, использование модели полубесконечного тела, упрощенные представления о теплообмене с окружающей средой и условиях поступления тепла в деталь от электрода и т.д. Для оптимизации технологических режимов необходимо изучить влияние максимального числа параметров и факторов

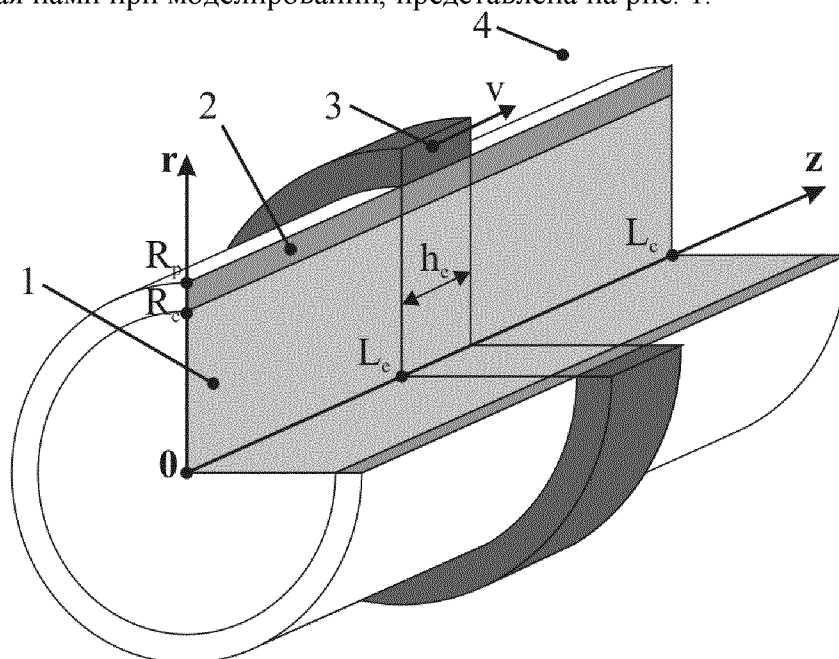
---

© Л.А. Лопата, Ю.В. Волков, А.В. Татаров, М.А. Писковая, 2010

процесса на температурное состояние детали и покрытия, что возможно путем построения наиболее полной математической модели, учитывающей всевозможные аспекты технологии электроконтактного упрочнения.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка математической модели, описывающей распространение тепла в условиях электроконтактного припекания, создания соответствующего программного обеспечения, а также детальное компьютерное моделирование тепловых процессов в изделии и покрытии при электроконтактном методе упрочнения.

**Результаты компьютерного моделирования.** В качестве базовой формы упрочняемых деталей нами была выбрана цилиндрическая, как наиболее часто используемая на практике [1]. Расчетная схема цилиндрической детали с покрытием, использованная нами при моделировании, представлена на рис. 1.



1 - деталь, 2 – порошок слой, 3 – электрод, 4 – окружающая газовая среда

Рисунок 1 - Расчетная схема цилиндрической детали с покрытием

Моделирование проводилось при следующих условиях. На боковую поверхность сплошного металлического цилиндра радиусом  $R_c$  и длиной  $L_c$  равномерным слоем нанесено порошковое покрытие толщиной  $R_p - R_c$  так, что последнее образует полый цилиндр с внешним радиусом  $R_p$ , внутренней поверхностью вплотную примыкающий к основной детали. Распределение начальной пористости покрытия по длине детали  $\Pi_0(z)$  полагается известным (в простейшем случае  $\Pi_0(z) = const$ ). Поверхности контакта между деталью и наносимым покрытием ( $r = R_c$ ) соответствует граничное условие IV рода, то есть равенства температур на контактирующих поверхностях и тепловых потоков через эти поверхности. По внешней цилиндрической поверхности слоя покрытия ( $r = R_p$ ) движется со скоростью  $v$  кольцевой источник тепла (электрод) ширины  $h_e$ . Данный кольцевой источник тепла работает в импульсном режиме, соответственно со временем импульса  $t_u$  и временем паузы  $t_n$ , которые циклично чередуются. От электрода на слой покрытия прикладывается давление  $p_e$ , в результате действия которого производится уплотнение слоя покрытия, т.е. уменьшение его пористости, что оказывает влияние на удельную электропроводность покрытия и другие теплофизические параметры. Во время импульса, под электродом, в области контакта электрод-слой покрытия,

выделяется тепло с интенсивностью  $W_e$ , определяемой возникающем при этом контактном сопротивлении и протекающим через контакт током  $I$ . Благодаря протекающему через деталь с покрытием току от кольцевого электрода, в рассматриваемой системе действуют внутренние источники тепла с интенсивностью  $W_{\text{int}}$ , расположенные в дисковидной области, перемещающейся синхронно с внешним кольцевым источником тепла в осевом направлении. На внешней боковой поверхности цилиндрического слоя покрытия (при  $r = R_p$ ), на участках, не занимаемых электродом, ставятся условия свободного теплообмена с окружающей средой (атмосферный воздух), имеющей температуру  $T_0$ . Такие же условия свободного теплообмена ставятся и на боковых поверхностях образуемого детали и покрытием двухслойного цилиндра (рис. 1), т.е. при  $z = 0$  и  $z = L_c$ . Ставится задача определить пространственно-временное распределение температуры в детали и порошковом слое, в зависимости от технологических режимов припекания, геометрических и теплофизических параметров детали и покрытия.

Для математического описания задачи определения температурного поля в системе деталь-покрытие при электроконтактном припекании приняты следующие допущения:

- рассматриваемая система деталь-покрытие обладает цилиндрической симметрией;

- поступающее в деталь с покрытием тепло в области контакта электрод-покрытие обусловлено величиной контактного сопротивления и протекающим через контакт током;

- влиянием нагрева электрода, выделением тепла от механической осадки покрытия в результате приложенного давления, а также действия других внешних поверхностных и объемных тепловых источников пренебрегается;

- действующие в детали и порошковом покрытии внутренние источники тепла распределены в дисковидной области, перемещающейся синхронно с кольцевым внешним источником тепла в осевом направлении;

- свободные поверхности цилиндрической детали с покрытием находятся в условиях свободного конвективного теплообмена с покоящейся окружающей газовой средой (атмосферный воздух).

Поставленная задача, с учетом изложенных допущений, будет описываться нестационарным двумерным уравнением теплопроводности, записанным в цилиндрических координатах:

$$\gamma_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W_{\text{int}}, \quad (i=1,2) \quad (1)$$

где  $T(r, z, t)$  - пространственно-временное распределение температуры в рассматриваемой системе;

$\gamma_i(T)$ ,  $C_i(T)$ ,  $\lambda_i(T)$  - плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала детали и покрытия;

$W_{\text{int}} = W_{\text{int}}(r, z, t)$  - объемная интенсивность ввода тепла от внутреннего источника.

Индексы  $i = 1$  принадлежат материалу детали, а  $i = 2$  материалу покрытия.

В рамках используемых приближений распределение внутренних источников тепла будет зависеть от местонахождения и импульсной работы внешнего кольцевого электрода. В таком случае объемная интенсивность внутренних источников тепла, действующих в элементе объема  $dV$ , будет определяться следующим образом:

$$W_{\text{int}}(r, z, t) = \frac{I^2 R_{\text{int}(i)}}{dV} \cdot \delta(z) \cdot \eta(t), \quad (2)$$

где  $R_{\text{int}(i)}$  - внутреннее электрическое сопротивление объема  $dV$ ;

$\delta(z)$ ,  $\eta(t)$  - функции, учитывающие пространственное перемещение внешнего и связанных с ним внутренних источников тепла, а также и их импульсный характер работы, и определяемые следующим образом:

$$\delta(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } v \cdot t \leq z \leq v \cdot t + h_e \\ 0, & \text{если } v \cdot t > z, z > v \cdot t + h_e \end{cases}; \quad (3)$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t - (t_u + t_n) \cdot k \leq t_u \\ 0, & \text{если } t - (t_u + t_n) \cdot k > t_u \end{cases}. \quad (4)$$

Здесь  $k$  – номер импульса.

Учитывая, что решение поставленной задачи отыскивается исходя из условий цилиндрической симметрии, элементарный участок тепловыделения будет определяться цилиндрической трубкой объемом  $dV = 2\pi r \cdot dr \cdot dz$ . Полагая, что внутренние источники тепла распределены в элементарном участке тепловыделения равномерно, для определения внутреннего электрического сопротивления объема  $dV$  сопоставим такой цилиндрической трубке параллелепипед с приведенной длиной  $l_{np} = \sqrt{2\pi r \cdot dr}$  и приведенной площадью поперечного сечения  $S_{np} = \sqrt{2\pi r \cdot dr} \cdot dz$ . Тогда, внутреннее электрическое сопротивление элементарного участка тепловыделения может быть определено, как

$$R_{\text{int}(i)} = \rho_i \frac{l_{np}}{S_{np}} = \frac{\rho_i}{dz}, \quad (5)$$

где  $\rho_i$  – удельное электрическое сопротивление материала детали и порошкового слоя покрытия.

Тогда, как удельное электрическое сопротивление материала детали будет зависеть, прежде всего, от температуры, т.е.  $\rho_1 = \rho_1(T)$ , удельное электрическое сопротивление порошкового слоя  $\rho_2$  будет находиться в зависимости также и от пористости слоя покрытия, т.е.  $\rho_2 = \rho_2(T, \Pi)$ . Вид такой зависимости выбирается на основе положений теории обобщенной проводимости для двухкомпонентных систем с учетом значения пористости в зоне тепловыделения. В зависимости от значения пористости, зависимость  $\rho_2(\Pi)$  будет аппроксимироваться следующими выражениями:

$$\rho_2(\Pi) = \begin{cases} \rho_2^0 \frac{1 + 0,5\Pi}{1 - \Pi}, & 0\% < \Pi < 5\% , \\ \rho_2^0 \frac{1 + \Pi}{1 - \Pi}, & 5\% \leq \Pi < 15\% , \end{cases} \quad (6)$$

где  $\rho_2^0 = \rho_2^0(T)$  - удельная электрическая проводимость материала покрытия.

В свою очередь, пористость покрытия, в результате действия приложенного от электрода давления  $p_e$ , со временем уменьшается согласно

$$\Pi(t_p) = \Pi_0 \exp(-Z \cdot t_p), \quad (7)$$

где  $t_p$  - время действия приложенного давления;

$$Z = \frac{4 p_e}{3 \sigma_T} - \text{критериальное число, характеризующее контактную площадь}$$

электрод-слой покрытия [1], а также степень деформации пористого слоя покрытия,  $\sigma_T$  - предел текучести материала покрытия.

Для решения нестационарного уравнения теплопроводности (1), совместно с замыкающими его соотношениями (2)-(7), необходимо задать начальные и граничные условия, соответствующие особенностям процесса электроконтактного припекания.

Будем полагать, что в начальный момент времени температура в детали и нанесенном на нее порошковом слое распределена равномерно и равна температуре окружающей среды  $T_0$ . Т.е. для начального распределения температуры будет выполняться условие

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (8)$$

Граничные условия на оси выбираются из соображений, что система обладает цилиндрической симметрией, т.е. при  $r = 0$  и  $0 \leq z < L_c$

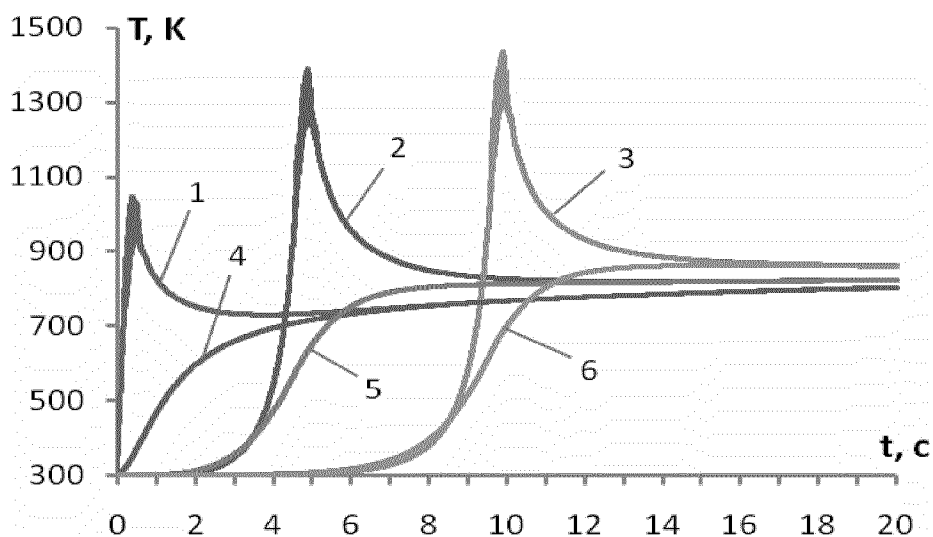
$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

Ввиду нелинейности коэффициентов уравнения (1), нестационарности и сложности постановки граничных условий, возможности аналитического решения такой задачи ограничены. Ввиду этих причин поставленная задача решалась численно, методом конечных разностей [3, 4].

При применении метода конечных разностей осуществляется переход от непрерывной области изменения аргументов  $r, z, t$  к конечно-разностной пространственно-временной сетке с множеством точек-узлов  $r_j, z_n$  и  $t_k$ . Нами при расчетах использовалась равномерная прямоугольная пространственная расчетная сетка с шагом по радиальной и аксиальной координатам  $\Delta r = r_{j+1} - r_j$ , где  $j = 1 \dots NR$  и  $\Delta z = z_{n+1} - z_n$ , где  $n = 1 \dots NZ$ , соответственно. Шаг сетки изменялся в соответствии с требуемой точностью. Шаг по времени  $\Delta t$  выбирался из условий сохранения устойчивости разностной схемы уравнения (1), в соответствии с рекомендациями [3, 4].

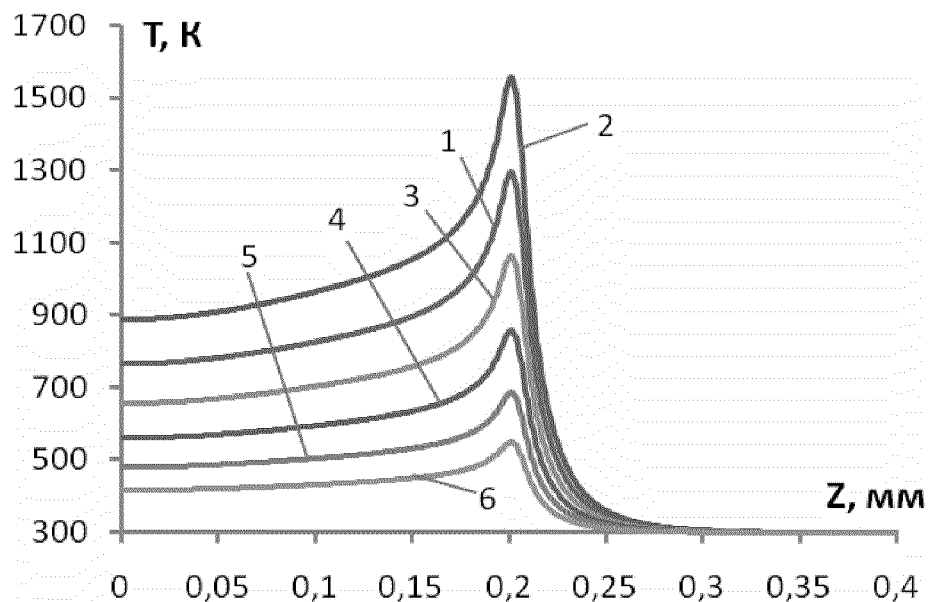
Для конечно-разностной аппроксимации уравнения (1) использовалась пространственная пятиточечная разностная схема с двухслойной неявной схемой по времени. Полученное разностное уравнение решалось методом прогонки, комбинированном с методом переменных направлений [3]. Устойчивость используемой разностной схемы исследовалась путем изменения шагов сетки, которые выбирались такими, чтобы дальнейшее их уменьшение не сказывалось на виде получаемого численного решения в пределах задаваемой точности вычислений. Вывод конечно-разностного аналога уравнения (1) и вычислительный алгоритм представлены в приложении.

На основе разработанной математической модели и созданного на ее основе программного обеспечения был проведен численный анализ особенностей нагрева детали и нанесенного на нее слоя покрытия при электроконтактном припекании.



1,4 – 0,01, 2,5 – 0,1, 3,6 – 0,2 м от левого торца детали

Рисунок 2 - Изменения со временем температуры в различных точках на поверхности припекаемого слоя (1-3) и внутри (0, 005 м от оси) цилиндрической детали (4-6)



1 – 16, 2 – 18, 3 – 14, 4 – 12, 5 – 10, 6 – 8 кА

Рисунок 3 - Влияние тока припекания на распределение температуры вдоль внешней поверхности детали с покрытием (в момент, когда электрод прошел половину длины детали)

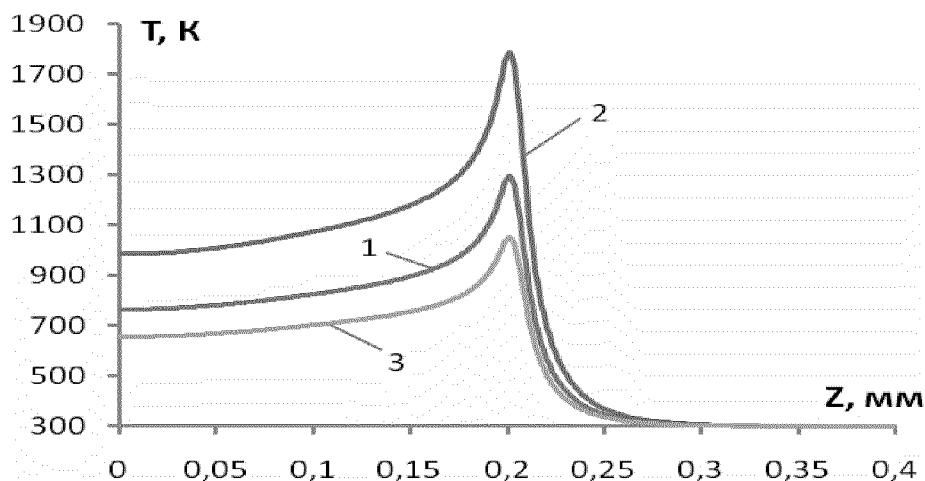


Рисунок 4 - Влияние приложенного давления на распределение температуры вдоль внешней поверхности детали с покрытием (в момент, когда электрод прошел половину длины детали)

**Вывод.** Разработана математическая модель температурного поля электроконтактного припекания в зависимости от технологических параметров процесса. Это создало условия для достижения максимальной скорости диффузионных процессов в контактной зоне „основа – покрытие” без ее оплавления, а так же узнать условия минимального уровня энергопотерь.

### Список литературы

1. Кочергин К.А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
2. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача. – М.: Металлургиздат, 1961. – 690 с.
3. Самарский А.А.. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич– М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
4. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. – 552 с.

*Л. Лопата, Ю. Волков, А.Татаров, М. Писковая*

#### **Математичне моделювання розповсюдження тепла при електроконтактному припеканні**

В пропонуемій статті показано, що характер протікання дифузійних процесів при припеканні залежить від рівня температури, її розподілу по шару і деталі, швидкості нагрівання і охолодження і зумовлює рівень залишкової напруги в покритті і в деталі, робить вплив на формування експлуатаційних властивостей покриттів, що наносяться. У зв'язку з цим отримання якісного покриття можливе тільки при підтримці необхідного співвідношення між температурою процесу (силою струму, тривалістю імпульсів і пауз) і величиною тиску, що додається. З цією метою було виконано математичне моделювання розповсюдження тепла при електроконтактному припеканні.

*L. Lopata, Yu. Volkov, A.Tatarov, M. Piskovaya*

#### **The mathematical design of distribution of heat was executed at electro-contact cauterization**

It is rotined in the proponuemiy article, that character of flowing of diffusive processes at cauterization depends on the level of temperature, its distributing on a layer and detail, speeds of heating and cooling and predetermines the level of remaining tension in coverage and in a detail, has influence on forming of operating properties of coverages which are inflicted. In this connection the receipt of high-quality coverage is possible only at support of necessary betweenness by the temperature of process (by force to the current, by duration of impulses and pauses) and size of pressure which is added. To that end the mathematical design of distribution of heat was executed at electro-contact cauterization.

Одержано 29.10.09