

УДК 621.81:620.169.1:621.794.61

UDC 621.81:620.169.1:621.794.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

MODELLING OF THERMAL PROCESS OF DRAWING COVERINGS

Горохова Марина Николаевна
к.т.н., доцент

Gorokhova Marina Nikolayevna
Cand.Tech.Sci., associate professor

Юдаев Юрий Алексеевич
д.т.н., профессор

Yudaev Yuri Alekseevich
Dr.Sci.Tech., professor

Санникова Марина Львовна
к.т.н., доцент

Sannikova Marina Lyvovna
Cand.Tech.Sci., associate professor

Горохов Александр Анатольевич
студент

Gorokhov Alexander Anatolyevich
student

Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия

Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia

В статье установлено, что распространение температурного режима при ЭИС соответствует известному процессу резания и поверхностного пластического деформирования с нагревом детали ацетиленкислородной горелкой, что позволяет совместить процесс наплавки присадочных порошков с отделочно-упрочняющей обработкой комбинированным инструментом в форме скобы-двухполюсника

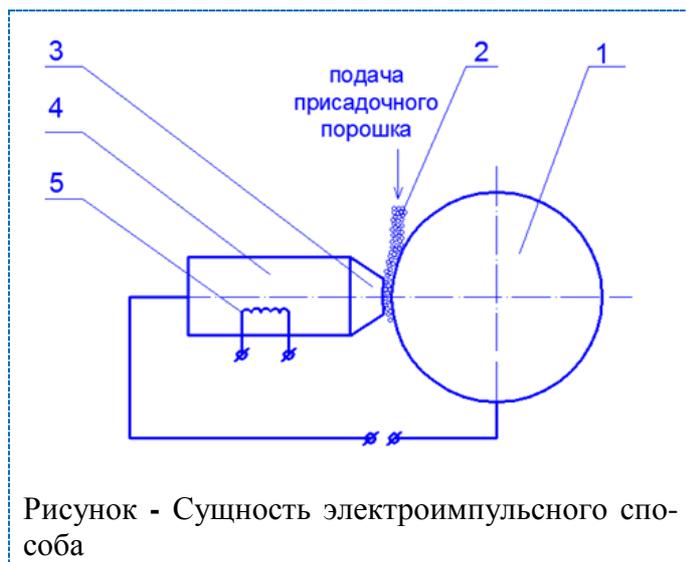
The article shows that the distribution of temperature regime in EIS corresponds to a known process of cutting and surface plastic deformation with heating details with acetylene-oxygen burner, which allows to combine the process of welding filler powders with finish-hardening treatment with combined instrument in the form of a two-pole bracket

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕПЛОВОЙ ПРОЦЕСС, ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ, МЕТАЛЛОПОКРЫТИЕ

Keywords: MODELING, THERMAL PROCESS, ELECTRICAL IMPULSE WAYS, METAL

В настоящее время одним из основных резервов повышения эффективности использования техники, экономии материальных, топливно-энергетических и трудовых ресурсов является нанесение металлопокрытий при изготовлении новых и восстановлении изношенных деталей. Экономическая целесообразность восстановления обусловлена возможностью повторного и неоднократного использования 65...75 % изношенных деталей. Себестоимость восстановления не превышает 10...30 % стоимости новых деталей, а расход материалов в 15...20 раз ниже, чем на их изготовление [1].

Перспективным в этом направлении является нанесение износостойких покрытий электроимпульсным способом.



Сущность электроимпульсного способа заключается в следующем: деталь 1 устанавливается с рабочим зазором относительно полюсного наконечника 3 сердечника 4 электромагнитной катушки 5. Сердечник 4 подключается к одному, а деталь – к другому полюсу источника

тока. При вращении детали 1 в рабочий зазор подается присадочный порошок 2. Ориентируясь вдоль магнитных силовых линий, зерна порошка образуют токопроводящие цепочки, замыкающие электрическую цепь. В результате электрических разрядов материал порошка переносится на деталь, образуя износостойкое покрытие.

Однако, в рыночных условиях экономического спада ремонтного производства традиционные технологические решения, ориентированные на массовый и крупносерийный тип, утратили практическую значимость. Реформирование экономики невозможно без развития и совершенствования различных форм хозяйствования, одна из которых – малые экономические структуры, которые рассматриваются в качестве символа производственной мобильности, рыночной гибкости и инновационной восприимчивости [2].

Таким образом, повышение эффективности нанесения износостойких покрытий электроимпульсным способом путем разработки комбинированного способа обработки, основанного на принципах технической самодостаточности малых ремонтных предприятий является актуальной задачей [3].

Комбинированный способ обработки основан на использовании технологического тепла, выделяемого в процессе реализации электроимпульсного способа, для интенсификации совместной отделочно-упрочняющей

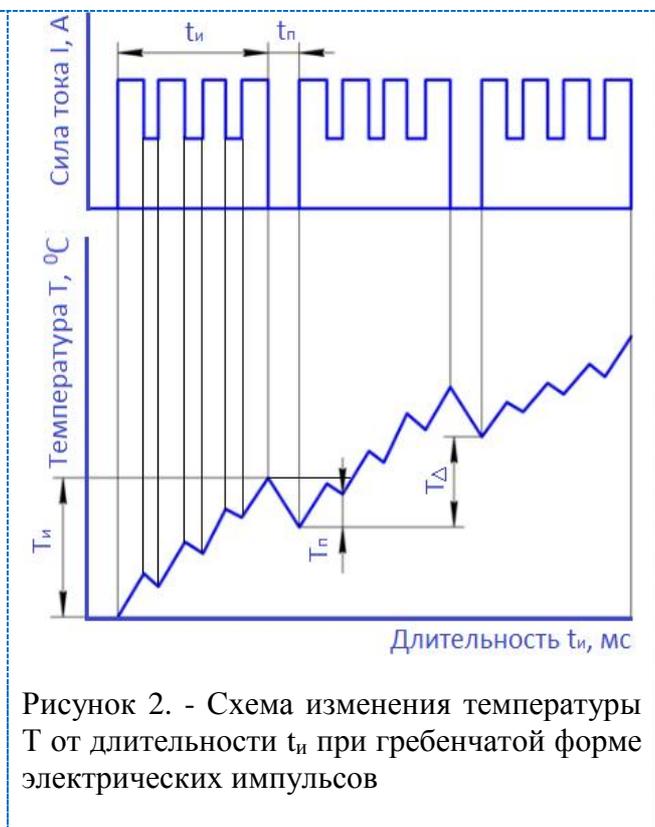
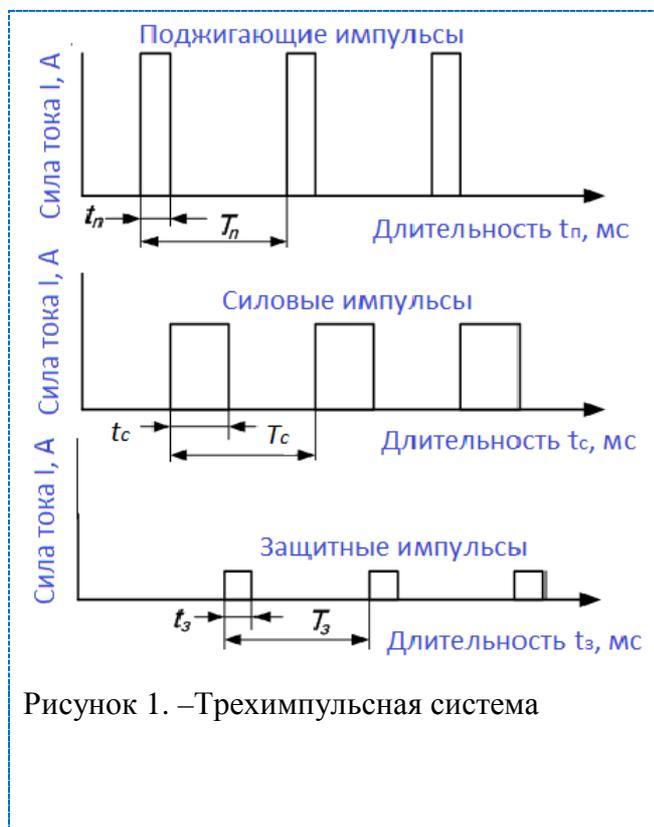
обработки комбинированным инструментом в форме скобы-двухполюсника при намагничивании присадочного порошка до процесса наплавки [4].

Используя основные положения теории теплопроводности, температурное поле при нагреве цилиндрической детали в общем виде можно представить уравнением:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 v(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v(r,t)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности; r – координата точки измерения температуры; t – время, прошедшее с момента выделения теплоты.

Количество тепла, создаваемого источником тока на поверхности детали, является функцией времени: $Q = f(t)$. При трехимпульсной системе (поджигающие, силовые и защитные импульсы) электрические импульсы формируются "пачками" (по 15 импульсов), что способствует равномерному воздействию теплового потока на поверхность детали и намагниченный присадочный порошок (рис.1).



В период пауз между электрическими импульсами и в период нахождения поверхности детали и намагниченного порошка вне межэлектродной зоны (полюсный наконечник-деталь) температура снижается вследствие теплоотдачи в основу детали и окружающую среду (рис.2).

Основным источником разогрева присадочных порошков, находящихся в межэлектродной зоне, является тепло, выделяющееся в области контакта частиц порошка с полюсным наконечником при прохождении импульсного электрического тока.

Количество тепла, выделяемое единичными электрическими импульсами, определим из выражения: $Q = 0,24W_u N t_u$, (2) где W_u – энергия единичного импульса; N – количество импульсов; t_u – длительность импульса.

Энергия единичного импульса:

$$W_u = I_a U_p \quad (3)$$

где I_a – амплитудное значение тока импульса; U_p – рабочее напряжение.

Намагниченный на деталь присадочный порошок расплавляется по винтовой линии с шагом, равным ширине полюсного наконечника. При скорости вращения детали более 0,06 м/с перемещение полюсного наконечника можно рассматривать в виде быстродвижущегося точечного источника теплоты.

При малом угле винтовой линии распространение теплоты может быть приравнено к распространению теплоты от мгновенного кольцевого

источника с погонной энергией $\frac{q}{v}$ на поверхности детали с намагниченным порошком (q – мощность источника теплоты, v – линейная скорость источника теплоты).

Температура поверхностного слоя детали от воздействия мгновенных кольцевых источников T_n :

$$T_n = \frac{2q}{\nu R c_p} \sum_{n=1}^n \Phi_n(r, t) \frac{e^{\frac{x_n^2}{4at_n} - bt_n}}{\sqrt{4\pi at_n}}, \quad (4)$$

где q – мощность источника теплоты; ν – линейная скорость источника теплоты; R – радиус детали; c_p – объемная теплоемкость материала детали; b – коэффициент теплоотдачи; x_n – расстояние источника теплоты до точки измерения температуры при n ^{ом} проходе; n – число проходов; t_n – время, прошедшее от начала процесса; $\Phi(r, t)$ – функция процесса выравнивания теплоты.

Функция процесса выравнивания теплоты $\Phi(r, t)$:

$$\Phi(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_k \frac{r}{R}\right)}{J_0(\mu_k)} \cdot e^{-\frac{\mu_k^2 at}{R^2}} \quad (5)$$

где μ_k – корни уравнения $J_k(\mu_k) = 0$, ($\mu_1 = 0$; $\mu_2 = 3,83$ и т. д.); J_0 и J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Численные значения функции процесса выравнивания теплоты $\Phi(r, t)$ определяем по номограмме [5] в зависимости от отношения $\frac{r}{R}$, где $r = R - y$; y – глубина измерения температуры.

Коэффициент температуропроводности a :

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала детали.

Коэффициент теплоотдачи b :

$$b = \frac{2\alpha}{c_p R} \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\alpha = \frac{\lambda}{c_p}$.

Процесс выравнивания температур при большом числе проходов описывается выражением:

$$T_n = \frac{qe^{-\frac{v_x X}{2a}}}{c\rho F \sqrt{4\pi a}} \int_{t_1}^{t_n} e^{-\left(\frac{v_x^2}{4a} + b\right)t - \frac{x^2}{4at}} \frac{dt}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

После преобразований интеграла (8) распространение температурного режима при ЭИС мощным и быстродвижущимся сосредоточенным источником, перемещающимся по винтовой линии с малым шагом, можно представить как результат суммарного воздействия кольцевых мгновенных источников в сочетании с процессом выравнивания температур:

$$T_n = \frac{q}{c\rho F \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}} e^{-\frac{v_x X}{2a} - \frac{v_x |X|}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}} \quad (9)$$

где F – площадь сечения детали; v_x – скорость движения источника тепло-

ты: $v_x = \frac{h}{t_n}$, где h – ширина полюсного наконечника; t_n – время, затраченное на один проход.

Таким образом, распространение температурного режима при ЭИС соответствует известному процессу резания и поверхностного пластического деформирования с нагревом детали ацетиленкислородной горелкой, что позволяет совместить процесс наплавки присадочных порошков ЭИС с отделочно-упрочняющей обработкой комбинированным инструментом в форме скобы-двухполюсника. Преимущество комбинированного способа обработки заключается в исключении дополнительного нагрева детали за счет использования технологического тепла, выделяемого ЭИС.

Для определения воздействия температурного режима на основу детали уравнение теплопроводности составляем с учетом пространственных координат r и z :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

В связи с наличием в уравнении теплопроводности пространственных координат r и z различают два вида схем: явные и неявные. Для решения

нестационарных задач теплопроводности необходимо построить разностные схемы, которые являются линейной комбинацией явной и неявной схем и называются схемами Кранка – Николсона [6].

В зависимости от того, в какой точке решается уравнение теплопроводности (на поверхности, во внутренней области, на боковых границах и нижней области) аппроксимация правой части уравнения (4) осуществлялась левыми, правыми или центральными разностями с граничными условиями:

$$T_{i,j,k} = T_0, \quad \text{при } t = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

$$T_{i,j,k} = \frac{F_{\Sigma}^+ - F_{\Sigma}^-}{\lambda(T_{i-1,j,k})} h + T_{i,j,k+1}, \quad \text{при } 0 \leq r \leq r_0;$$

$$T_{i,j,k} = -\frac{F_{\Sigma}^-}{\lambda(T_{i-1,j,k})} h + T_{i,j,k+1}, \quad \text{при } r > r_0.$$

Для точек, лежащих на поверхности расчетной области выражение (10) заменялось дискретным уравнением (11):

$$T_{i+1,j,k} = a(T_{i,j,k}) \Delta t \left(\left(\frac{1}{jh} \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}}{h} + \frac{T_{i,j-1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j+1,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j,k+2} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i,j,k}}{h^2} \right) \right) + T_{i,j,k} \quad (11)$$

Для точек, лежащих во внутренней области детали выражение (10) заменялось дискретным уравнением (12):

$$T_{i+1,j,k} = a(T_{i,j,k}) \Delta t \left(\left(\frac{1}{jh} \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}}{h} + \frac{T_{i,j-1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j+1,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j,k+1} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j,k-1}}{h^2} \right) \right) + T_{i,j,k} \quad (12)$$

Для точек, лежащих на боковых границах выражение (10) заменялось дискретным уравнением (13):

$$T_{i+1,j,k} = a(T_{i,j,k})\Delta t \left(\left(\frac{1}{jh} \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k}}{h} + \frac{T_{i,j-2,k} - 2T_{i,j-1,k} + T_{i,j,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j,k+1} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j,k-1}}{h^2} \right) \right) + T_{i,j,k} \quad (13)$$

Для точек, лежащих на нижней области выражение (10) заменялось дискретным уравнением (14):

$$T_{i+1,j,k} = a(T_{i,j,k})\Delta t \left(\left(\frac{1}{jh} \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k}}{h} + \frac{T_{i,j-2,k} - 2T_{i,j-1,k} + T_{i,j,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j,k} - 2T_{i,j,k-1} + T_{i,j,k-2}}{h^2} \right) \right) + T_{i,j,k} \quad (14)$$

Экспериментальные исследования проводились на ферромагнитных деталях. При моделировании принималось равномерное выделение мощности: $P = 250$ Вт (удельная мощность $P_s = 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м²) на участке диаметром $d = 1$ мм. Время электрического разряда составляло $t_n = 10$ мс, время паузы - $t_0 = 10$ мс.

Для постановки краевой задачи использовались результаты экспериментальных зависимостей: осциллограммы токов и напряжений. На осциллограммах снятых термопарой установленной на глубине 0,5 мм видны характерные крупные всплески, возникающие в момент нахождения спая термопары в межэлектродной зоне, с наложением на них мелких всплесков, возникающих при прохождении единичных импульсов тока. На осциллограммах, снятых на глубине 3,5 мм, всплески менее крупные, а на глубине 6,5 мм – наблюдается незначительное нарастание и спад всплесков. На глубине 0,5 мм наибольшая температура детали составляет 320°C, на глубине 3,5 мм – 200°C, на глубине 6,5 мм – 140°C.

Таким образом, большая часть тепла аккумулируется в материале порошка и на поверхности детали, а незначительная часть отводится в основу. Низкотемпературное воздействие на материал основы не вызывает коробления деталей и создает благоприятные условия для интенсификации

отделочно-упрочняющей обработки разработанным комбинированным инструментом в форме скобы-двухполюсника.

На рисунках 3-6 представлены зависимости температуры T в центре зоны наплавления от пространственных координат r, z после единичного электрического разряда и паузы.

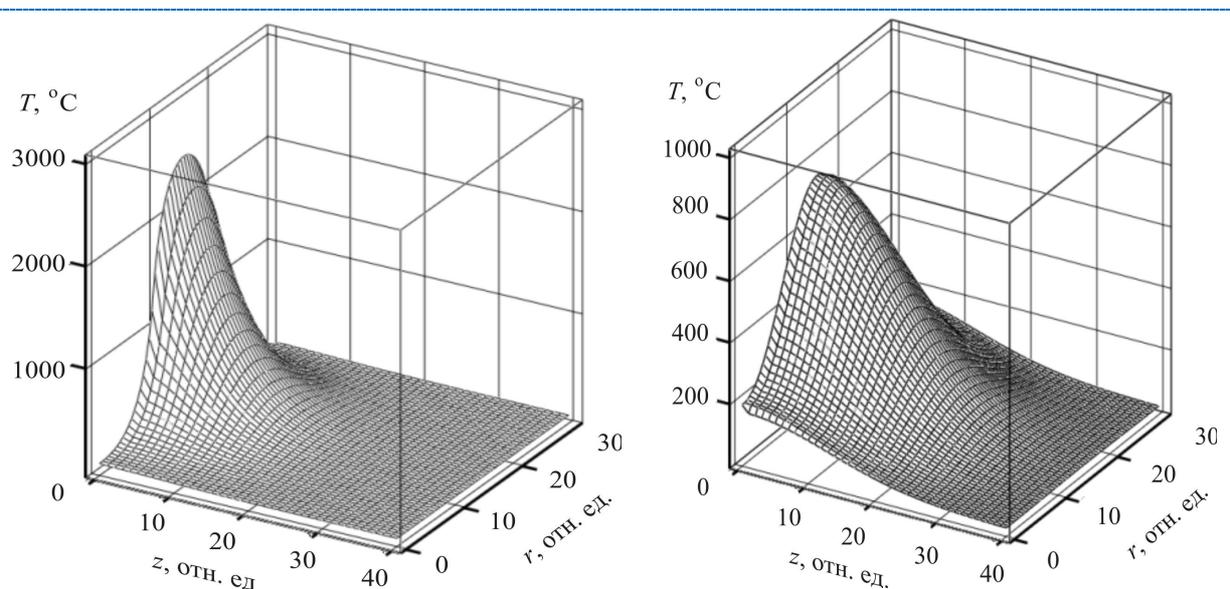


Рисунок 3. - Зависимость температуры $T^{\circ}\text{C}$ от пространственных координат r, z после единичного электрического разряда

Рисунок 4. - Зависимость температуры $T^{\circ}\text{C}$ от пространственных координат r, z после паузы

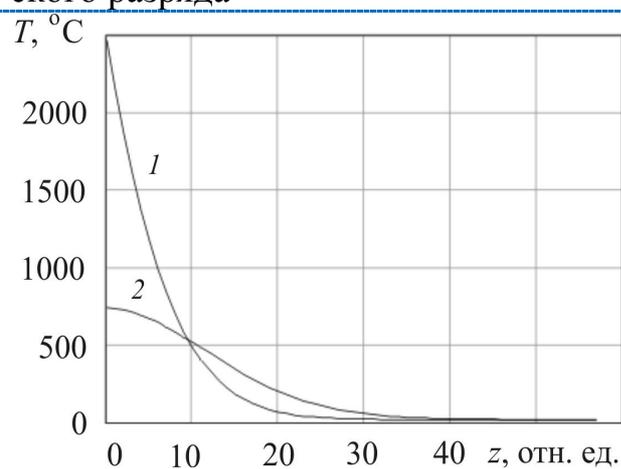


Рисунок 5.- Зависимость температуры $T^{\circ}\text{C}$ детали от пространственной координаты z : 1 - после единичного электрического разряда; 2 – после паузы

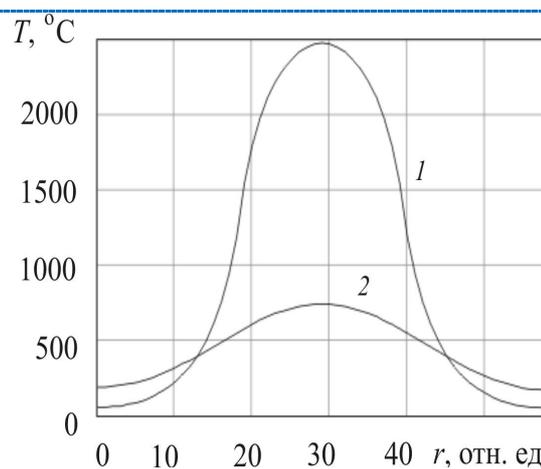


Рисунок 6. - Зависимость температуры $T^{\circ}\text{C}$ от пространственной координаты r : 1 - после единичного электрического разряда; 2 – после паузы

На рисунке 7 представлена зависимость температуры $T^{\circ}\text{C}$ на поверхности детали в центре зоны наплавления от длительности электрического импульса t .

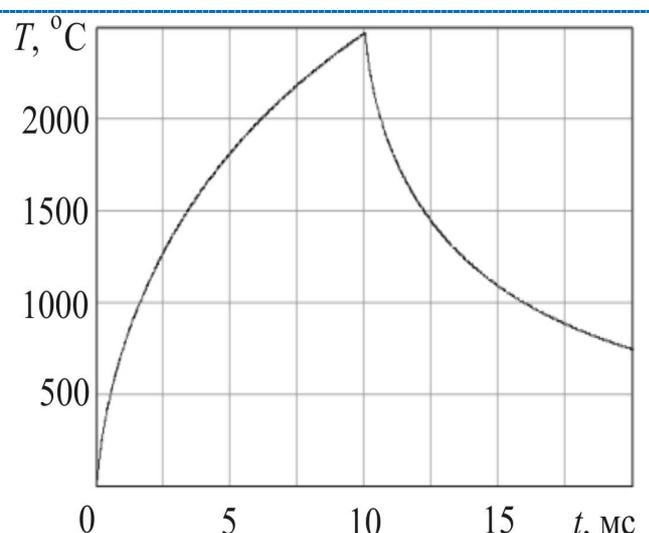


Рисунок 7. – Зависимость температуры детали $T^{\circ}\text{C}$ от длительности электрического импульса t

Таким образом, разностные схемы, являющиеся линейной комбинацией явной и неявной схем, имеют высокий порядок аппроксимации по пространственным координатам r , z и являются абсолютно устойчивыми. Однако при нарушении условия монотонности температуры, что характерно для импульсной подачи электрического тока, необходимо подбирать длительность элек-

трических импульсов t .

Моделирование теплового процесса электроимпульсного способа нанесения металлопокрытий было принято при разработке комбинированного инструмента в форме скобы-двухполюсника для реализации комбинированного способа обработки, что позволило существенно повысить производительность электроимпульсного способа в условиях малых ремонтных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горохова М.Н. Влияние полярного эффекта и материала электродов на перенос присадочных порошковых материалов при электроимпульсном способе / М.Н. Горохова, Д.Г. Чурилов // Труды ГОСНИТИ. Том 109 часть 2. - Москва: ГОСНИТИ, 2012. - С.51-56.
2. Горохова М.Н. Влияние фазового угла смещения напряжения на качество покрытий при комбинированном методе // Тракторы и сельхозмашины. – Москва, 2011. - № 11. – С. 48-52.
3. Патент № 2473413 РФ, МПК В23 К11/10, В23 К35/30. Способ нанесения покрытия с помощью электроконтактной сварки с использованием порошкового присадочного материала, содержащего железный порошок и присадочный материал для его осу-

ществления /М.Н. Горохова, В.И. Черноиванов, Р.Ю. Соловьев. Оpubл. 27.01.2013. Бюл. №3.

4. Горохова М.Н., Пучин Е.А., Соцкая И.М. Нанесение металлопокрытий комбинированным способом обработки на детали с неопределенным химическим составом: монография. – Рязань: Изд-во РГАТУ, 2013. – 58 с.

5. Арефьев А.С., Антошкин В. А., Юдаев Ю. А. Моделирование процессов эрозии электродов газоразрядных приборов // Тез.докл. IX-ой конференц. по физике газового разряда. Т.2. Рязань. 1998. С. 108-109.

6. Арефьев А.С., Антошкин В.А, Юдаев Ю. А. Расчет электрического поля на иррегулярных сетках // Информатика и прикладная математика. РГПУ, Рязань,1999. С.31-37.

References

1 . Gorohova M. N. Influence of polar effect and material of electrodes on transfer of additive powder materials at an electropulse way/M of N. Gorokhov, D. G. Churilov//STATE THREAD Works. Volume 109 part 2. - Moscow: STATE THREADS, 2012. – P. 51-56.

2 . Gorohova M. N. Influence of a phase corner of shift of tension on quality of coverings at the combined method//Tractors and agricultural cars. – Moscow, 2011. - N 11. – P. 48-52.

3 . Patent No. 2473413 Russian Federation, MPK V23 K11/10, B23 K35/30. Way of drawing a covering by means of electrocontact welding with use of the powder additive material containing iron powder and an additive material for its implementation/ M.N. Gorohova, V.I.Chernoivanov, R.Yu.Solovyev. Opubl. 27.01.2013. Bulletin N3.

4 . Gorohova M. N., E.A Abysses. Sotsky I.M. Naneseniye of metal coatings in the combined way of processing on a detail with uncertain chemical structure: monograph. – Ryazan: RGATU publishing house, 2013. – 58 p.

5 . Arefyev A.S., Antoshkin V. A., Yudayev Yu. A. Modeling of processes of an erosion of electrodes of gas-discharge devices//Tez.Dokl. IX-th conference. on physics of the gas category. T.2. Ryazan. 1998 . Page 108-109.

6 . Arefyev A.S., Antoshkin of VA, Yudayev Yu. A. Calculation of electric field on irregular grids//Informatics and applied mathematics. RGPU, Ryazan, 1999. P. 31-37.