

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

UDC 621.793.74: 621.791.927.55

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОКРЫТИЙ****MATHEMATICAL MODEL OF PLASMA SPRAYING THERMAL PROCESSES WITH ELECTROMECHANICAL TREATING OF COATINGS**

Кадырметов Анвар Минирович  
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин  
*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Kadyrmetov Anwar Minirovich  
Cand.Tech. Sci., associate professor  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

Рассмотрен вопрос теоретического описания объекта исследования – комбинированного процесса плазменного напыления с одновременной электро-механической обработкой напыляемого покрытия, включающего два источника тепла (пятно плазменного напыления и место контакта ролика с подложкой) и два стока тепла от водоохлаждающих струй. Представлено достаточно полное описание факторов процесса и их значимости. Разработана математическая модель тепловых процессов объекта исследования на основе представлений контактной или шовной сварки

Theoretical questions and data of combined process of plasma spraying with simultaneous electromechanical sprayed coating treating are presented. This process includes two heat sources (plasma spraying spot and contact place of roller with sublayer) and two drains of heat from watercooled jets. The process factors and their values are described on a full scale. The mathematical model of thermal process in above-mentioned object of investigation is worked out on idea of contact or seam welding

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ, ПЛАЗМЕННАЯ СТРУЯ, ВОДООХЛАЖДАЮЩАЯ СТРУЯ, ОБКАТЫВАЮЩИЙ РОЛИК

Keywords: MATHEMATICAL MODEL, PLASMA SPRAYING, ELECTROMECHANICAL TREATING, SPRAYED COATING, PLASMA JET, WATERCOOLED JET, BREAKING-IN ROLLER

**Введение**

Электромеханическая обработка (ЭМО) плазменных покрытий относится к перспективным направлениям повышения их качества, позволяющим существенно увеличить их прочностные и триботехнические характеристики, в том числе, и при наличии высоких эксплуатационных нагрузок (динамических, знакопеременных, подверженных абразивному, коррозионному, высокотемпературному или иному воздействию) [1, 2]. В работе рассмотрен перспективный комбинированный метод нанесения плазменных покрытий, совмещающий процесс плазменного напыления покрытия с его одновременной электро-механической обработкой ЭМО. Показано, что он характеризуется сложным, нелинейным характером воздействия факторов на свойства и геометрию тела, которые, в первую очередь, определяются температурой и деформацией

материала. Данные обстоятельства определяют сложность разработки математических моделей процессов формирования и упрочнения покрытий. Для оценки температур покрытия в процессе плазменного напыления с ЭМО в качестве основы использовано математическое описание процессов при контактной (шовной) сварке [3], модифицированное для системы «плазменное покрытие-основа». Статья посвящена вопросу разработки математической модели тепловых процессов ресурсосберегающей комбинированной технологии плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой покрытия с целью оптимизации её режимных параметров.

### **Состояние исследований и актуальность работы**

Объектом математического моделирования является комбинированный процесс плазменного напыления, включающий воздействие на наносимый плазменной струей слой покрытия электромеханической обработки в одной технологической операции (рис. 1). На наносимый слой покрытия воздействуют два источника тепла (от плазменной струи и джоулева тепла от ролика) и два стока тепла от охлаждающих струй. Известные работы по изучению тепловых вопросов были посвящены отдельно плазменному напылению и электромеханической обработке. Электромеханическая обработка при этом включает в себя помимо теплового воздействия на покрытие ещё и механическое воздействие с определенным усилием. Все это характеризует данный процесс как весьма сложный для моделирования. В известных подходах решения тепловых задач при моделировании электромеханической обработки покрытий используются численные методы [4]. Однако такой подход для оперативных производственных технологических задач является достаточно трудоемким, требующим квалифицированных специалистов по программированию или наличия специальных программ; он не позволяет быстро оценить влияние технологических факторов на качество покрытий и найти их оптимальные



## Математическая модель комбинированного процесса плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой покрытия

*Составляющие подвода и отвода тепла*

Значения температуры покрытия в зоне ЭМО определяется его теплосодержанием  $Q_{тс}$ , которое зависит от величины подвода  $Q_{п}$  и отвода  $Q_{о}$  тепла за время  $t$

$$Q_{п} = Q_{тс} + Q_{о} . \quad (1)$$

В установившихся процессах теплосодержание, а следовательно, и температура в зоне ЭМО будет постоянна, в переходных, импульсных процессах – переменна.

В общем случае теплоподвод  $Q_{п}$  в данной системе в процессе одновременного напыления покрытия и его ЭМО (рис. 1) в местах контактов ролика с покрытием и покрытия с деталью складывается из следующих составляющих:

$$Q_{п} = Q_{пл} + Q_{рд} + Q_{м} + Q_{п} + Q_{т} , \quad (2)$$

где  $Q_{пл}$ ,  $Q_{рд}$ ,  $Q_{м}$  – теплоподвод от плазменной струи, в цепи «ролик-деталь» и за счет механической энергии деформации поверхности от обкатывающего ролика соответственно;  $Q_{п}$ ,  $Q_{т}$  – тепловыделение или теплопоглощение, обусловленное эффектами Пельтье и Томсона соответственно.

Теплоотвод в данной системе  $Q_{о}$  складывается из составляющих:

$$Q_{о} = q_{д} + q_{п} + q_{яд} + q_{яп} + q_{э} + q_{о} , \quad (3)$$

где  $q_{д}$ ,  $q_{п}$ ,  $q_{яд}$ ,  $q_{яп}$ ,  $q_{э}$ ,  $q_{о}$  – соответственно тепловые потери в материал детали и в покрытие от нерасплавленной зоны и от ядра расплава в зоне границы «покрытие-подложка», в электрод-ролик и в теплоотдачу от свободной поверхности покрытия, в том числе и в охлаждающую жидкость.

Теплосодержание массы материала в зоне ЭМО определяется зависимостью

$$Q_{тс} = g_{тд} \cdot T_{тд} \cdot S_{мд} \cdot h_{мд} \cdot c_{тд} + g_{тп} \cdot T_{тп} \cdot S_{тп} \cdot h_{тп} \cdot c_{тп} , \quad (4)$$

где  $S_{тп}$ ,  $h_{тп}$  – площадь и толщина покрытия в зоне ЭМО соответственно;  $S_{тд}$  – площадь контакта детали в зоне ЭМО;  $h_{мд}$  – высота зоны энергосвечения контактного сопротивления со стороны основы, равная эквивалентной глубине проникновения тока и составляющая 0,63 от полной глубины проникновения тока [4], см:

$$h_{мд} = 5000 \sqrt{\rho_d t / \mu_d} , \quad (5)$$

где  $\mu_d$  – относительная магнитная проницаемость материала основы;  $\rho_d$  – удельное сопротивление материала поверхности детали при абсолютной температуре  $T$  в зоне их контакта с покрытием, Ом·см;  $t$  – время, с;  $T_{тп}$ ,  $\gamma_{тп}$ ,  $c_{тп}$  – соответственно температура, плотность и теплосодержание единицы массы материала покрытия в зоне ЭМО, отнесенное к градусу Цельсия;  $T_{тд}$ ,  $\gamma_{тд}$ ,  $c_{тд}$  – соответственно температура, плотность и теплосодержание единицы массы материала детали в зоне ЭМО, отнесенное к градусу Цельсия.

#### *Теплопровод в электрической цепи «ролик-деталь»*

В соответствии с законом Джоуля-Ленца

$$Q_{рд} = I^2 \cdot (R_{в} + R_{н} + R_{Гп} + R_{Гд}) \cdot t_{н} , \quad (6)$$

где  $I$  – сила тока в цепи «ролик-деталь»;  $R_{в}$ ,  $R_{н}$  – сопротивления контакта между покрытием и основой, контакта между роликом и покрытием соответственно;  $R_{Гп}$ ,  $R_{Гд}$  – соответственно сопротивление покрытия и основы с учетом геометрии искривления линий электрического тока, определяемого контурной площадью контакта;  $t_{н}$  – время нагрева;

Сопротивление контакта между покрытием и деталью может быть представлено суммой:

$$R_{в} = r_{мг} + r_{пл} + r_{гр} , \quad (7)$$

где  $r_{мг}$  – внутреннее электрическое сопротивление контакта, которое создается искривлением линий электрического тока при протекании через

микроконтакты шероховатости;  $r_{пл}$  – электрическое сопротивление материала оксидной пленки поверхности основы:

$$r_{пл} = \frac{\xi\psi}{S_T} \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_{пл}} \right); \quad (8)$$

где  $\xi$  – удельное сопротивление оксидной пленки;  $\psi$  – толщина оксидной пленки;  $\theta$  – фактическая температура пленки;  $\theta_{пл}$  – температура плавления пленки;  $r_{гр}$  – полярное сопротивление границы оксид-металл, обусловленное тем, что, во-первых, каждый оксид является полупроводником и на границе с чистым металлом он создает электронно-дырочный переход. Во-вторых, в случае возникновения жидкого металла вследствие его расплавления на границе покрытия с поверхностью детали также возникает полярное электрическое сопротивление;  $S_T$  – площадь контакта ролика с покрытием, равная при обработке цилиндрических поверхностей [5, 6]:

$$S_T = 2 \cdot p \cdot (\Delta_y + \Delta_{п}) \cdot \sqrt{\frac{r_p \cdot R_p \cdot \rho_{пов}}{r_p + R_p}} \quad \text{или} \quad S_T \approx \Delta h_{покр} \cdot \sqrt{\frac{r_p \cdot R_p \cdot \rho_{пов}}{r_p + R_p}},$$

а при обработке плоских поверхностей:

$$S_T = 2 \cdot p \cdot (\Delta_y + \Delta_{п}) \cdot \sqrt{r_p \cdot R_p} \quad \text{или} \quad S_T \approx \Delta h_{покр} \cdot \sqrt{r_p \cdot R_p};$$

где  $R_p$ ,  $r_p$  – радиус ролика и радиус скругления его поверхности соответственно;  $\rho_{пов}$  – радиус обрабатываемой поверхности детали;  $\Delta_y$ ,  $\Delta_{п}$  – упругая и пластическая деформации обрабатываемой поверхности. При чистовых операциях ЭМО конструкционных незакаленных сталей для усилия сглаживания 300-500 Н можно принять  $\Delta_y + \Delta_{п} \approx 0,85 \cdot R_z$  [5];  $\Delta h_{покр}$  – изменение толщины покрытия в результате пластической деформации [6]:

$$\Delta h_{покр} = h_{покр} \cdot (1 - \Pi);$$

где  $\Pi$  – пористость покрытия.

Электрическое сопротивление контакта электрод-деталь (в нашем случае электрод-покрытие)  $R_n$  до сих пор, как правило, отдельно не рассчитывают. Его, по предложению А. С. Гельмана [7], принимают равным половине величины сопротивления в контакте деталь-деталь (в нашем случае покрытие-деталь)  $R_b$ , т. е.:

$$R_n = R_b / 2. \quad (9)$$

Сопротивления покрытия  $R_{Гп}$  и основы  $R_{Гд}$  с учетом геометрии искривлений линий электрического тока по их длине  $h$  и по площади их поперечного сечения  $\Delta S$  в зоне контакта (в объемах  $V_n$  и  $V_d$ ) непостоянны вследствие нестационарности процесса обработки и изменения температуры зоны контакта (см. рисунок 2), и рассчитываются на основе формулы

$$R_{Гп} = \iint_{V_n} \frac{\rho_n(h) \cdot dh}{\Delta S(h)} dS; \quad R_{Гд} = \iint_{V_d} \frac{\rho_d(h) \cdot dh}{\Delta S(h)} dS; \quad (10)$$

где  $\rho_d$ ,  $\rho_n$  – удельные сопротивления материалов поверхности детали и покрытия при абсолютной температуре  $T$  в зоне их контакта соответственно:

$$\begin{aligned} \rho_d &= \rho_{дпл} \cdot T / T_{дпл}; \\ \rho_n &= \rho_{нпл} \cdot T / T_{нпл}; \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\rho_{дпл}$ ,  $\rho_{нпл}$  – удельные сопротивления материалов поверхности детали и покрытия при их абсолютных температурах плавления  $T_{дпл}$  и  $T_{нпл}$  соответственно;

Усредненно с учетом зависимости (11)

$$\begin{aligned} R_{Гд} &= \rho_{дпл} \cdot h_{мд} \cdot T / (S_{Гд} \cdot T_{дпл}); \\ R_{Гп} &= \rho_{нпл} \cdot h_{п} \cdot T / (S_{Гп} \cdot T_{нпл}); \end{aligned} \quad (12)$$

где  $S_{Гд}$ ,  $S_{Гп}$  – усредненная площадь переменного сечения потока силовых линий электрического тока в зоне энерговыделения контактного сопротивления в материале основы и покрытия соответственно.

В процессе прохождения локального участка обкатываемой поверхности роликом в зоне контакта покрытия с поверхностью детали суммарное сопротивление контакта, покрытия и основы  $R_{п-д} = R_{в} + R_{Гп} + R_{Гд}$  в общем случае может проходить четыре стадии, представленные на рисунке 2. Формулы для расчета данных сопротивлений в зависимости от стадии обработки представлены в таблице 1 [4].

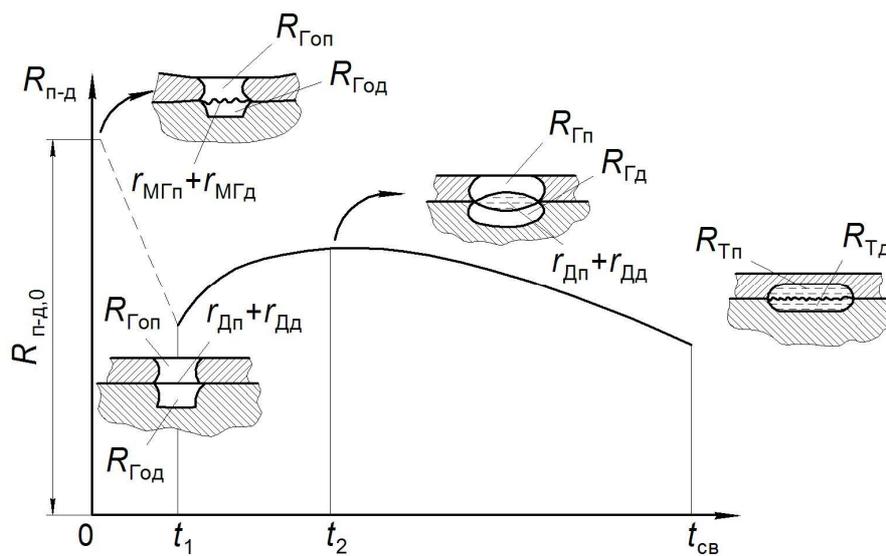


Рис. 2. Изменение суммарного электрического сопротивления контакта, покрытия и основы  $R_{п-д}$  в процессе электромеханического упрочнения по времени  $t$

Таблица 3 – Зависимости, определяющие суммарное электрическое сопротивление контакта, покрытия и основы  $R_{п-д}$ , соответствующие моментам времени  $t = 0; t_1; t_2; t_{св}$  (см. рисунок 2)

Момент времени по рис. 1	Что определяет измеряемое или рассчитываемое значение сопротивления	Расчетные формулы, приближенно определяющие это значение	Номер формул
1	2	3	4
$t = 0$	Микрогеометрия (шероховатость) контакта	$r_{МГп} = \frac{(1 \div 2) \cdot \rho_{\Deltaп} \cdot \Delta}{3A_c \sqrt{1 - e^{-X_n}}}; \quad r_{МГд} = \frac{(1 \div 2) \cdot \rho_{\Deltaд} \cdot \Delta}{3A_c \sqrt{1 - e^{-X_d}}}$ $\rho_{\Deltaп} = r_{п} \left[ (1 + \alpha_{п} T) + \frac{a}{\Delta} e^{p/\sigma_{Тп}} \right]; \quad \rho_{\Deltaд} = \rho_{д} \left[ (1 + \alpha_{д} T) + \frac{a}{\Delta} e^{p/\sigma_{Тд}} \right]$ $X_{п} = \beta_{п} \cdot \sigma_{п} \cdot T / (\sigma_{Тп} \cdot T_{плп}); \quad X_{д} = \beta_{д} \cdot \sigma_{д} \cdot T / (\sigma_{Тд} \cdot T_{плд})$ $\beta_{п} = T_{плп} / [T_{н} \cdot (1 \dots 2) \cdot b]; \quad \beta_{д} = T_{плд} / [T_{н} \cdot (1 \dots 2) \cdot b]$	(14)

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
	<p>Геометрия линий электрического тока вокруг холодного контакта со стороны покрытия и основы соответственно</p>	$R_{\Gamma_{\text{Оп}}} = \frac{4\rho_{\text{п}} h_{\text{мп}}}{\pi b_{\text{оп}} d_0}; \quad R_{\Gamma_{\text{Од}}} = \frac{4\rho_{\text{д}} h_{\text{мд}}}{\pi b_{\text{од}} d_0}$ $d_0 = d_{0Э} \sqrt{1 - e^{-X_{\text{п}}}}$ $b_{\text{оп}} = \delta_{\text{П экв}} / [\ln(D_{\text{п}} / d_0) + 0,5]; \quad b_{\text{од}} = h_{\text{мд}} / [\ln(D_{\text{д}} / d_0) + 0,5]$ $\delta_{\text{П экв}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{п}} t / \mu_{\text{п}}}; \quad h_{\text{мд}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{д}} t / \mu_{\text{д}}}$	
$t = t_1$	<p>Горячий диск из смятых и расплавленных шероховатостей между покрытием и основой</p> <p>Геометрия линий тока у него</p>	$r_{\text{Дп}} = \frac{4\rho_{\text{Тп}} \Delta}{\pi d_{\text{д}}^2}; \quad r_{\text{Дд}} = \frac{4\rho_{\text{Тд}} \Delta}{\pi d_{\text{д}}^2}$ $R_{\Gamma_{\text{Оп}}} = \frac{4\rho_{\text{Тп}} h_{\text{мп}}}{\pi b_{\text{п}} d}; \quad R_{\Gamma_{\text{Од}}} = \frac{4\rho_{\text{Тд}} h_{\text{мд}}}{\pi b_{\text{д}} d}$ $d = d_3 \sqrt{1 - e^{-X_{\text{п}}}}$ $b_{\text{п}} = \delta_{\text{П экв}} / [\ln(D_{\text{п}} / d) + 0,5]; \quad b_{\text{д}} = h_{\text{мд}} / [\ln(D_{\text{д}} / d) + 0,5]$ $\delta_{\text{П экв}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{п}} t / \mu_{\text{п}}}; \quad h_{\text{мд}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{д}} t / \mu_{\text{д}}}$	(15)
$t = t_2$	<p>Превращение диска в расплавленное ядро</p> <p>Геометрия линий тока в горячем диске</p>	$r_{\text{Дп}} = \frac{4\rho_{\text{Тп}} h_{\text{яп}}}{\pi d_{\text{Т}}^2}; \quad r_{\text{Дд}} = \frac{4\rho_{\text{Тд}} h_{\text{яд}}}{\pi d_{\text{Т}}^2}$ $R_{\Gamma_{\text{п}}} = \frac{4\rho_{\text{Тп}} (h_{\text{п}} - h_{\text{яп}})}{\pi b_{\text{п}} d}; \quad R_{\Gamma_{\text{д}}} = \frac{4\rho_{\text{Тд}} (h_{\text{мд}} - h_{\text{яд}})}{\pi b_{\text{д}} d}$ $d = d_3 \sqrt{1 - e^{-X_{\text{п}}}}$ $b_{\text{п}} = \delta_{\text{П экв}} / [\ln(D_{\text{п}} / d) + 0,5]; \quad b_{\text{д}} = h_{\text{мд}} / [\ln(D_{\text{д}} / d) + 0,5]$ $\delta_{\text{П экв}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{п}} t / \mu_{\text{п}}}; \quad h_{\text{мд}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{д}} t / \mu_{\text{д}}}$	(16)
$t = t_{\text{св}}$	<p>Сопротивление готового расплавленного ядра</p> <p>Геометрия линий тока в горячем металле у расплавленного ядра</p>	$r_{\Gamma_{\text{п}}} = \frac{4\rho_{\text{Тп}} h_{\text{яп}}}{\pi d_{\text{Т}}^2}; \quad r_{\Gamma_{\text{д}}} = \frac{4\rho_{\text{Тд}} h_{\text{яд}}}{\pi d_{\text{Т}}^2}$ $R_{\Gamma_{\text{п}}} = \frac{4\rho_{\text{Тп}} (h_{\text{п}} - h_{\text{яп}})}{\pi b_{\text{п}} d}; \quad R_{\Gamma_{\text{д}}} = \frac{4\rho_{\text{Тд}} (h_{\text{мд}} - h_{\text{яд}})}{\pi b_{\text{д}} d}$ $d = d_3 \sqrt{1 - e^{-X_{\text{п}}}}$ $b_{\text{п}} = \delta_{\text{П экв}} / [\ln(D_{\text{п}} / d) + 0,5]; \quad b_{\text{д}} = h_{\text{мд}} / [\ln(D_{\text{д}} / d) + 0,5]$ $\delta_{\text{П экв}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{п}} t / \mu_{\text{п}}}; \quad h_{\text{мд}} = 5000 \sqrt{\rho_{\text{д}} t / \mu_{\text{д}}}$	(17)

В формулах таблицы 1 используются следующие обозначения:

индексы сопротивлений «п» и «д» соответствуют контактирующим поверхностям покрытия и основы соответственно, индекс «Д» – горячему или расплавленному диску контакта «покрытие-основа», «Г» – расплавленному ядру контакта «покрытие-основа», «МГ» – микрогеометрии поверхности контакта (шероховатости), «Г» – геометрии линий тока контакта;  $d_{0Э}$ ,  $d_{Э}$  – эквивалентный диаметр контурной площади контакта ролика с покрытием;  $d_0$ ,  $d$  – эквивалентный диаметр фактической площади контакта ролика с покрытием;  $D_{п}$ ,  $D_{д}$  – эквивалентный диаметр площади в покрытии и основе соответственно, на котором напряженность магнитного поля минимальна. Исходя из закона полного тока:  $H_{п} = I / (\pi \cdot D_{п})$ ,  $H_{д} = I / (\pi \cdot D_{д})$ . Отсюда следует, что зависимость напряженностей магнитного поля в покрытии  $H_{п}$  и в детали  $H_{д}$  от расстояния  $D_{п} / 2$  и  $D_{д} / 2$  соответственно при постоянном токе  $I$  является гиперболической:  $H_{п} / H_{п0} = D_{п0} / D_{п}$ ;  $H_{д} / H_{д0} = D_{д0} / D_{д}$ . Если принимать падение напряженности магнитного поля до величины 3 % от напряженности на границе области прохождения тока с эквивалентными диаметрами  $D_{пЭ}$  и  $D_{дЭ}$ , то данные диаметры равны соответственно  $D_{п} = 33 \cdot D_{пЭ}$ ,  $D_{д} = 33 \cdot D_{дЭ}$ . Как правило, это больше максимального размера поперечного сечения детали в зоне обработки, следовательно, в качестве  $D_{п}$ ,  $D_{д}$  надо брать эти максимальные размеры;  $b$  – экспериментально полученный параметр неровности шероховатой поверхности детали по данным [8], характеризующий ее деформационную способность чисто геометрически; значения параметра  $b$  меняются от 1 до 10 в зависимости от способа обработки поверхности;  $b_{0п}$ ,  $b_{0д}$  ( $b_{п}$ ,  $b_{д}$ ) – расстояние, на которое линии тока растекаются (при магнитной проницаемости  $\mu \approx 1$ ) или сжимаются (при  $\mu > 1$ ) в покрытии и основе соответственно;  $\rho_{\Deltaп}$ ,  $\rho_{\Deltaд}$  – удельное сопротивление материала микровыступа шероховатости (пирамиды) покрытия и основы соответственно;  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{д}$  – удельное сопротивление материала покрытия и основы соответственно;  $\rho_{Гп}$ ,  $\rho_{Гд}$  – удельное сопротивление горячего или расплавленного материала покрытия и основы соответственно;  $\mu_{п}$ ,  $\mu_{д}$  – относительная магнитная проницаемость ма-

териала покрытия и основы соответственно;  $h_{мп}$  – толщина покрытия в зоне ЭМО;  $h_{мд}$  – высота зоны энерговыделения контактного сопротивления со стороны основы (см. формулу (5));  $\delta_{П экв}$  – высота зоны энерговыделения контактного сопротивления в покрытии; при  $\delta_{П экв} > h_{мп}$  принимается равной  $h_{мп}$ ;  $h_{яп}$ ,  $h_{яд}$  – высота зоны расплавленного материала покрытия и основы соответственно;  $A_c$  – контурная площадь контакта «покрытие-основа».

Величина  $X$  является критериальным числом, определяющим деформационное подобие перехода фактической площади контакта в контурную под действием давления и нагрева;  $\sigma_{п}$ ,  $\sigma_{д}$  – действительное напряжение при деформировании материала покрытия и основы соответственно;  $\sigma_{Тп}$ ,  $\sigma_{Тд}$  – предел текучести материала покрытия и основы соответственно;  $p/\sigma_{Тп}$ ,  $p/\sigma_{Тд}$  – отношение давления, действующего на контурную площадь контакта, к пределу текучести сильно наклепанного металла покрытия и основы соответственно;  $\alpha_{п}$ ,  $\alpha_{д}$  – температурный коэффициент сопротивления материала покрытия и основы соответственно;  $a$  – размер основания микровыступа шероховатости в виде четырехугольной пирамиды основы;  $\Delta$  – высота микровыступа шероховатости (пирамиды) основы;  $T_n$  – нормальная температура.

*Теплоподвод за счет механической энергии трения  $Q_{тр}$  и деформации поверхности  $Q_m$  от обкатывающего ролика*

$$Q_{тр} = f \cdot P_N, \quad (18)$$

где  $f$  – коэффициент трения ролика о поверхность покрытия, по данным Б. М. Аскинази [4] для среднеуглеродистой стали при средних режимах ЭМО  $f \approx 0,65 \dots 0,75$ ;  $P_N$  – сила прижима ролика к покрытию.

Мощность трения

$$N = Q_{тр} \cdot v, \quad (19)$$

где  $v$  – скорость трения ролика о покрытие.

$$Q_m = P \cdot h_m, \quad (20)$$

где  $P$  – тангенциальная сила смятия покрытия;  $h_m$  – величина пластической деформации покрытия от ролика.

Для режимов сглаживания при ЭМО по данным [9] теплотой, выделяемой вследствие деформаций можно пренебречь.

#### *Тепловые эффекты Пельтье и Томсона*

Эффект Пельтье заключается в выделении или поглощении тепла в зависимости от направления электрического тока в местах контакта электрода с покрытием  $Q_{Пэп}$  и покрытия с основой  $Q_{Ппд}$  при пропускании через них электрического тока  $I$ :

$$Q_{Пэп} = P_{эп} \cdot I \cdot t; \quad Q_{Ппд} = P_{пд} \cdot I \cdot t;$$

где  $P_{эп}$ ,  $P_{пд}$  – коэффициенты Пельтье, зависящие от материалов контакта электрода с покрытием и покрытия с основой соответственно, Дж/(А·с).

Эффект Томсона заключается в выделении или поглощении тепла в зависимости от направления тока при его протекании через контакт проводников ( $Q_{Тэп}$  – для контакта электрода с покрытием;  $Q_{Тпд}$  – для контакта покрытия с основой), имеющих различную температуру

$$Q_{Тэп} = \sigma_{эп} \cdot \Delta\theta_{эп} \cdot I \cdot t; \quad Q_{Тпд} = \sigma_{пд} \cdot \Delta\theta_{пд} \cdot I \cdot t;$$

где  $\sigma_{эп}$ ,  $\sigma_{пд}$  – коэффициенты Томсона, зависящие от рода проводника и температуры для материалов контакта электрода с покрытием и покрытия с основой соответственно, Дж/(град·А·с);  $\Delta\theta_{эп}$ ,  $\Delta\theta_{пд}$  – разность температур в зоне контакта электрода с покрытием и покрытия с электродом соответственно.

Для большинства материалов величина коэффициента Пельтье составляет  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Дж/(А·с). Коэффициент Томсона имеет еще меньшие значения. Поэтому ввиду их малости можно эффектами Пельтье и Томсона пренебречь.

#### *Теплоотвод из зоны ЭМО покрытия*

Тепловые потери из зоны тепловыделения «покрытие-основа» в окружающий материал покрытия и основы обусловлены теплопроводностью и определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 q_{\text{яд}} &= T_{\text{я}} \cdot S_{\text{яд}} \sqrt{\pi \lambda_{\text{д}} \gamma_{\text{д}} c_{\text{д}} t} ; \\
 q_{\text{яп}} &= T_{\text{я}} \cdot S_{\text{яп}} \sqrt{\pi \lambda_{\text{п}} \gamma_{\text{п}} c_{\text{п}} t} ; \\
 q_{\text{д}} &= \frac{T_{\text{я}} + T_{\text{д}}}{2} S_{\text{д}} \sqrt{\pi \lambda_{\text{д}} \gamma_{\text{д}} c_{\text{д}} t} ; \\
 q_{\text{п}} &= \frac{T_{\text{я}} + T_{\text{пм}}}{2} S_{\text{п}} \sqrt{\pi \lambda_{\text{п}} \gamma_{\text{п}} c_{\text{п}} t} ;
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

где  $T_{\text{я}}$  – температура ядра в переходной зоне «покрытие-основа»;  $T_{\text{пм}}$  – температура поверхности под обкатывающим электродом;  $T_{\text{д}}$  – температура внутри детали;  $S_{\text{яд}}$ ,  $S_{\text{яп}}$  – площадь боковой поверхности ядра переходной зоны «покрытие-основа», через которую теплота отводится теплопроводностью в основу и покрытие соответственно;  $S_{\text{д}}$  – площадь боковой поверхности слоя основы между ядром переходной зоны «покрытие-основа» и высотой зоны энерговыведения контактного сопротивления в основе  $h_{\text{мд}}$  (формула (5)), через которую теплота отводится теплопроводностью в основу;  $S_{\text{п}}$  – площадь боковой поверхности слоя покрытия между ядром переходной зоны «покрытие-основа» и зоной контакта электрода (ролика) с покрытием, через которую теплота отводится теплопроводностью в покрытие;  $\lambda_{\text{д}}$ ,  $\lambda_{\text{п}}$  – теплопроводность материала основы и покрытия соответственно;  $\gamma_{\text{д}}$ ,  $\gamma_{\text{п}}$  – плотность материала основы и покрытия соответственно;  $c_{\text{д}}$ ,  $c_{\text{п}}$  – теплосодержание единицы массы материала основы и покрытия соответственно, отнесенное к градусу Цельсия.

Тепловые потери в электрод могут определяться теплопроводностью [4]:

$$q_{\text{э}} = T_{\text{э}} \cdot S_{\text{э}} \sqrt{\pi \lambda_{\text{э}} \gamma_{\text{э}} c_{\text{э}} t} ;
 \tag{22}$$

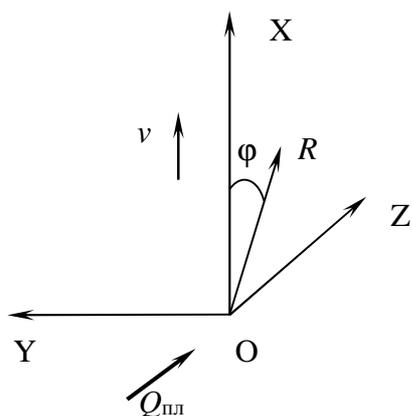
где  $T_{\text{э}}$  – температура контактной поверхности электрода, принимаемая на 100-200 °С меньше температуры поверхности материала, обкатываемого роликом-электродом;  $S_{\text{э}}$  – площадь контакта электрода с поверхностью ос-

новы или покрытия;  $\lambda_э$  – теплопроводность материала электрода;  $\gamma_э$  – плотность материала электрода;  $c_э$  – теплосодержание единицы массы материала электрода, отнесенное к градусу Цельсия.

Коэффициент распределения теплоты  $\mu$ , выделяемой в зоне между электродом и материалом обрабатываемой детали (доля тепла, поглощаемого деталью) по данным Б. М. Аскинази [5] находится в интервале 0,5-0,6. Без учета размеров электрода и детали и скорости их относительного перемещения данный коэффициент может быть оценен зависимостью [10]:

$$\mu = \frac{\lambda_д}{\lambda_э} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_д}{\alpha_э}}; \tag{23}$$

где  $\lambda_д$ ,  $\lambda_э$  – теплопроводность материалов основы и электрода соответственно;  $\alpha_д$ ,  $\alpha_э$  – температуропроводность материалов основы и электрода соответственно.



*Теплоподвод от плазменной струи*

Рассмотрим случай, когда на поверхности полуограниченного тела движется в направлении оси OX с постоянной скоростью  $v$  точечный источник тепла мощностью  $q_{пл}$ . Начало координат совпадает с источником тепла (рис. 3). Имеем квазиустановившейся режим.

Рис. 3. К расчету тепловой задачи для полуограниченного тела

Начальное условие:

$$q_{пл} \Big|_{\tau \geq 0} = q_{пл}, \tag{24}$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \tag{25}$$

$$T \Big|_{z=\infty} = 0. \tag{26}$$

Были приняты следующие допущения:

1 Мощность источника тепла постоянная ( $q_{пл} = \text{const}$ ) во все время нанесения покрытия.

2 Источник тепла сосредоточен в элементарном точечном объеме; погрешность оценки температуры от этого в области пятна напыления до глубины, равной диаметру напыления может быть учтена в дальнейшем.

3 Источник тепла равномерно и прямолинейно перемещается по изделию с постоянной скоростью ( $v = \text{const}$ ).

4 Распространение тепла в теле происходит по закону теплопроводности Фурье.

5 Граница тела непроницаема для теплоотдачи от тела.

6 Коэффициенты теплофизических свойств основного металла (коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость) не зависят от температуры.

7 Фазовые и структурные превращения металла покрытия происходят без выделения и поглощения тепла.

8 Временем теплонасыщения можно пренебречь.

Тогда решение будет иметь вид [11]:

$$T(R, x, \infty) = \frac{q_{пл}}{2\pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{v \cdot x}{2a} - \frac{v \cdot R}{2a}}, \quad (27)$$

где  $R$  – радиус-вектор от теплового источника, м,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/сек;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·град.

При  $x = 0, y = 0$  имеем  $R = z$ .

Для оценки значений поля максимальных температур поверхности основы, исходя из изложенных положений, предварительно выберем минимально необходимую скорость перемещения плазмотрона для случая движения и нагрева полуограниченного тела. Для этого зададимся максимальной температурой  $T_{\text{max}}$  на заданной глубине основы  $R$  и заданным тепловым потоком мощностью  $q_{пл}$ .

Для плазменного напыления тепловой поток  $Q_{пл}$ , воспринимаемый подложкой, составляет 30-50 % от мощности плазмотрона [12]. При мощности микроплазмотрона 2000 Вт это составит 600...1000 Вт. Решение уравнения (27) относительно скорости  $u$  имеет вид:

$$v = -\frac{2a}{x+R} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot T \cdot \lambda \cdot R}{q_{пл}}. \quad (28)$$

Для случая  $a = 6,87 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda = 29$  Вт/м·град. Примем  $x = 0$ ,  $R = 0,004$  м,  $T = 400$  °С. Тогда  $v = 0,0025 \dots 0,0042$  м/с.

На основе решения (27) может быть получено распределение температур в пятне напыления.

Значения времени запаздывания  $t_m$ , по истечении которого после прохождения источника тепла в данной точке на глубине  $z$  будет иметь место максимальная температура  $T_m$  [11]:

$$t_m = \frac{z^2}{2a}. \quad (29)$$

Координата  $X_m$  по оси  $OX$  относительно источника тепла будет определена зависимостью:

$$X_m = v \cdot t_m. \quad (30)$$

Максимальная температура  $T_m$  в указанной точке может быть определена выражением [11]:

$$T_m(z) = \frac{2}{\pi \cdot e} \cdot \frac{q_{пл}}{v \cdot C_\gamma \cdot z^2}, \quad (31)$$

где  $C_\gamma$  – объемная теплоемкость тела, Дж/м<sup>3</sup>·К.

Для того, чтобы определить температуру в остальных точках, необходимо знать значение температуры в процессе ее выравнивания через время  $\sim t_B + t_m$ , где  $t_B$  – время выравнивания температуры:

$$t_B = R/v,$$

где  $R$  – расстояние от центра пятна напыления до рассматриваемой точки;  
 $v$  – скорость перемещения плазматрона (см. рисунок 1).

Процесс выравнивания по окончании действия источника тепла описывается наложением двух одинаковых по величине и разных по знаку процессов теплонасыщения, сдвинутых по времени на величину  $\sim t_m$  [11]:

$$T_B(x, y, z; t) \Big|_{t=t_m} = T(x, y, z; t) - T(x, y, z; t - t_m). \quad (32)$$

Определим температуру  $T_B$  для нашего случая через время  $t_B + t_m$ .

Безразмерные критерии времени для моментов  $t = t_B + t_m$  и  $t_m$  [11] равны:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{v^2 \cdot (t_B + t_m)}{4a} \\ \tau_B &= \frac{v^2 \cdot t_B}{4a} \end{aligned} \right\}, \quad (33)$$

$$\tau - \tau_B = \frac{v^2 \cdot t_m}{4a}. \quad (34)$$

Положение фиктивного источника – стока в момент времени  $t$  определяется координатами:

$$\left. \begin{aligned} x &= v \cdot t_B - v \cdot t = -v \cdot t_m, \\ y &= 0, \\ R &= \sqrt{x^2 + z^2}. \end{aligned} \right\}. \quad (35)$$

Критерий Пекле, пропорциональный радиальному расстоянию, равен

$$J_3 = \frac{v \cdot R}{2a}. \quad (36)$$

Температуру предельного состояния  $T_m(z)$  в точке  $R$  определим по зависимости (27).

Коэффициенты теплонасыщения поля источника  $\psi_3(J_3, \tau - \tau_m)$  соответственно определим по зависимости, полученной в работе [11]:

$$\Psi_3(J_3, t - t_m) = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \Phi \left( \frac{J_3}{2 \cdot \sqrt{\tau - \tau_m}} - \sqrt{\tau - \tau_m} \right) + \frac{1}{2} \cdot e^{2 \cdot J_3} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{J_3}{2 \cdot \sqrt{\tau - \tau_m}} + \sqrt{\tau - \tau_m} \right) \right] \right], \quad (37)$$

где  $\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-z^2} dz$  – функция интеграла вероятности Гаусса.

Тогда температура  $T_B$  точки в момент времени  $t = t_b + t_m$  определится согласно (34):

$$T_B(x; y; z; t_B + t_m) = [Y_3(J_3, \tau - \tau_b) - Y_3(J_3, \tau - \tau_b)] \cdot T_m(z) \quad (38)$$

Оценка температуры восстановления при расстояниях от пятна напыления плазменной струи более 0,04 м по зависимости [10]

$$T(R, t)|_{t \gg t_B} = \frac{2 \cdot q_{пл} \cdot t_B}{C_{\gamma} \cdot (4\pi \cdot a \cdot t)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{R^2}{4at}} \quad (39)$$

показывает, что ее значения не превосходят 2 °С. Таким образом, температурой восстановления для расстояний от пятна напыления более 0,04 м можно пренебречь.

#### *Тепловые потери с поверхности покрытия от охлаждающей жидкости*

При струйном жидкостном охлаждении горячей поверхности с температурой, превышающей температуру насыщения для данной жидкости при определенном давлении (в данном случае равном атмосферному) возможны три режима: кипение в пленке; «смачивающий» режим взаимодействия капель с охлаждаемой поверхностью; «несмачивающий» режим взаимодействия капель с охлаждаемой поверхностью [13]. При этом температурный напор, соответствующий максимуму теплоотдачи, примерно прямо пропорционален плотности потока жидкости в степени 0,2:  $\Delta T_{кр} \sim j^{0,2}$ .

При охлаждении основы температурой до 150-200 °С наблюдается пленочное кипение воды, при котором жидкость отделена от обогреваемой

поверхности тела паровым слоем [14]. Предположим, что охлаждающая вода нагревается до температуры кипения и после этого полностью испаряется, а образовавшийся пар не успевает нагреться выше 100 °С (373 К) и, если полагать, что тепло, отданное поверхностью тела, есть теплота фазового перехода, будем иметь:

$$m_{\text{в}} = m_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{T}}}{q + c_{\text{в}} \cdot (373 - T_{\text{в}})}, \quad (40)$$

где  $m_{\text{в}}$  – массовый расход воды, кг/сек;  $m_{\text{п}}$  – количество образовавшегося пара, кг/сек;  $Q_{\text{T}}$  – тепловой поток идущий от поверхности тела к подводящей жидкости, Дж/сек;  $q$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·К;  $T_{\text{в}}$  – температура охлаждающей воды, К ( $T_{\text{в}} = 300$  К).

Согласно закону Ньютона-Рихмана тепловой поток, идущий за промежуток времени от поверхности тела к жидкости, равен:

$$dQ_{\text{T}} = \alpha \cdot (T_{\text{T}} - T_{\text{в}}) \cdot dF, \quad (41)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $T_{\text{T}}$  – температура поверхности тела, К;  $F$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>.

Предположим, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и температурный напор ( $T_{\text{T}} - T_{\text{в}}$ ) не изменяются по поверхности  $dF$ , тогда:

$$Q_{\text{T}} = \alpha \cdot (T_{\text{T}} - T_{\text{в}}) \cdot F, \quad (42)$$

Подставив (42) в (40) получим:

$$m_{\text{в}} = \frac{\alpha \cdot (T_{\text{T}} - 300) \cdot F}{q + 73 \cdot c_{\text{в}}}. \quad (43)$$

При условии, что через паровой слой теплота переносится только теплопроводностью, то коэффициент теплоотдачи будет равен:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\delta}, \quad (44)$$

где  $\lambda_{\text{п}}$  – коэффициент теплопроводности пара, Вт/м·К;  $\delta$  – средняя толщина возникающего парового слоя, м.

Средняя толщина возникающего парового слоя связана с поверхностным натяжением через капиллярную постоянную и принимается [14]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}}, \quad (45)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность охлаждающей воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, массовый расход охлаждающей воды с учетом (44) и (45) будет равен:

$$m_{\text{в}} = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}}} \cdot \frac{(T_{\text{т}} - 300) \cdot F}{q + 73 \cdot c_{\text{в}}}. \quad (46)$$

Выражение (46) показывает прямую зависимость массового расхода охлаждающей воды от ее физических свойств, а также от температуры и геометрических размеров тела.

Учитывая предположение, что охлаждающая вода нагревается до температуры кипения и после этого полностью испаряется, получим значения следующих величин. Теплопроводность пара  $\lambda_{\text{п}} = 6,83 \cdot 10^3$  Вт/м·К, поверхностное натяжение  $\sigma = 588,6 \cdot 10^4$  Н/м, плотность воды при 27 °С  $\rho_{\text{в}} = 997$  кг/м<sup>3</sup>, плотность пара при 100 °С  $\rho_{\text{п}} = 958$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплота парообразования воды при 100 °С  $q = 419,1 \cdot 10^3$  Дж/кг, удельная теплоемкость воды  $c_{\text{в}} = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/кг·К. Подставим эти значения в выражение (46) получим:

$$m_{\text{в}} = 7,58 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{\text{т}} - 300) \cdot F. \quad (47)$$

В случае, если к концу процесса обкатки в локальной области «покрытие-основа» под роликом успеваеет расплавиться переходная зона контакта, то на эту операцию затрачена энергия

$$Q_{\text{к}} = \frac{4I^2 \rho_{\text{т}} h t}{\pi d_{\text{т}}^2},$$

где  $\rho_T$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – высота зоны расплава, м;  $d_{тэ}$  – эквивалентный диаметр зоны расплава, м.

Эта энергия расходуется на плавление металла ядра и тепловые потери. Их можно определить зависимостями для энтальпии и тепловых потерь в основу и покрытие

$$q_{тс} = \gamma c \frac{\rho d_T^2}{4} h T_{пл}; \quad q_M = 4n T_{пл} \sqrt{\lambda \gamma c} \cdot S \cdot \sqrt{t}, \quad \text{где } S = v \cdot t \cdot \delta.$$

### Оценка эффективности математической модели

Разработанная математическая модель, дополненная алгоритмом, просто реализуется в простейших программах, в том числе табличных процессорах, таких как Excel. Модель позволяет просто находить влияния основных факторов процесса на поле температур обрабатываемого покрытия и основы. Это дает возможность её использования в практических технологических задачах. Возможные погрешности модели ввиду ее простоты могут быть учтены поправочными коэффициентами. Недостатком модель является её квазистационарный характер и невозможность описания динамических процессов (импульсных, переходных).

### Выводы

Для оценки температур покрытия в процессе плазменного напыления с ЭМО разработана математическая модель на основе использования математического аппарата процессов при контактной (шовной) сварке [3], модифицированная для системы «плазменное покрытие-основа».

Объектом математического моделирования является перспективный комбинированный процесс, включающий воздействие на наносимый плазменной струей слой покрытия электромеханической обработки в одной технологической операции.

Модель включает в себя интегральные соотношения подвода и отвода тепла, изменения теплосодержания металла обрабатываемой переходной зоны

«покрытие-основа», зависимости для определения составляющих электрических сопротивлений контактных зон, закон Джоуля-Ленца, известные зависимости распределения тепла от пятна плазменного напыления и зон охлаждения.

Модель позволяет просто находить влияния основных факторов процесса на поле температур обрабатываемого покрытия и основы. Это дает возможность её использования в практических технологических задачах, в том числе, для оптимизации режимов обработки покрытия.

### Список литературы

1 Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей. Патент № 2338005 С23С 4/18. Багмутов В. П., Калита В. И., Паршев С. Н., Захаров И. Н.

2 Кадырметов, А. М. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. Н. Бухтояров, Е. В. Снятков, А. Ф. Мальцев // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: В 2 частях : материалы 14-й международной научно-практической конференции. Часть 1 – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2012. – С. 75-79.

3 Кочергин, К. К. Контактная сварка [Текст] / К. К. Кочергин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1987. – 240 с.

4 Захаров И. Н. Системная постановка и решение задач механики формирования структуры и свойств металлических тел при интенсивных технологических воздействиях: Автореф. дис. ... доктора. техн. наук: 01. 02. 04 / ВГТУ. – Волгоград, 2012. – 40 с.

5 Аскинази, Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой [Текст] / Б. М. Аскинази. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 200 с.

6 Патент № 2338005 Россия, МПК С 23 С 4/18, В23Н9/00. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей / Багмутов В. П., Калита В. И., Паршев С. Н., Захаров И. Н.; ВолГТУ. – №2006145603/02; заявлено 20.12.2006; опубл. 10.11.08. – 9 с.

7 Гельман, А. С. Основы сварки давлением [Текст] / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение. – 1970. – 312 с.

8 Гуляев, А. И. Технология точечной и рельефной сварки [Текст] / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение. – 1978. – 245 с.

9 Багмутов, В. П. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация [Текст] / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров. – Новосибирск: Наука, 2003. – 318 с.

10 Лыков, А. В. Тепломассообмен. Справочник [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

11 Рыкалин, Н. Н. Тепловые основы сварки. Ч. 1. Процессы распространения тепла при дуговой сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 272 с.

12 Антошин Е. В. Газотермическое напыление покрытий [Текст] / Е. В. Антошин. – М.: Машиностроение, 1974. – 96 с.

13 Исаченко, В. П. Струйное охлаждение [Текст] / В. П. Исаченко, В. И. Кушнырев. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.

14 Исаченко, В. П. Теплопередача: Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. [Текст] / В. П. Исаченко и др. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

### References

1 Method of combined hardening of surfaces of details. Patent № 2338005 C23C 4/18. Bagmutov V. P., Kalita V. I., Parshev S. N., Zakharov I. N.

2 Kadyrmetov, A. M. Prospects of hardening coatings by plasma spraying with simultaneous processing of electromechanical [Text] / A. M. Kadyrmetov, V. O. Nikonov, V. N. Bukhtoiarov, E. V. Sniatkov, A. F. Maltcev // Technology of hardening, surface coating and repair: theory and practice: in 2 parts: proceedings of the 14-th international scientifically-practical Conference. Part 1 – SPb : Publishing House of the polytechnic university press, 2012. – P. 75-79.

3 Kochergin, K. K. Resistance welding [Text] / K. K. Kochergin. – L. : Engineering, Leningrad branch. 1987. – 240 p.

4 Zakharov I. N. The desktop setting and the mechanics of formation of structure and properties of metal bodies at intensive technological influences: Avtoref. dis. ... doctor. technology. science: 01.02.04 / VGTU. – Volgograd, 2012. – 40 p.

5 Askinazi, B. M. Hardening and recovery machine parts electromechanical treatment [Text] / B. M. Askinazi. – 3 ed., revised. and extras. – M : Engineering, 1989. – 200 p.

6 Patent № 2338005 of Russia, MPK C 23 C 4/18, B23H9/00. The method of combined surface hardening of parts / Bagmutov V. P., Kalita V. I., Parshev S. N., Zakharov I. N.; VolGTU. – № 2006145603/02; 20.12.2006 stated; posted on 10.11.08. – 9 p.

7 Gelman, A. S. The basics of welding pressure [Text] / A. S. Gelman. – M. : Engineering, 1970. – 312 p.

8 Guliaev, A. I. Technology of spot and projection welding [Text] / A. I. Guliaev. – M. : Engineering, 1978. – 245 p.

9 Bagmutov, V. P. Electro-mechanical processing: technology and physical fundamentals, properties, sale [Text] / V. P. Bagmutov, S. N. Parshev, N. G. Dudkina, I. N. Zakharov. – Novosibirsk: Science, 2003. – 318 p.

10 Lykov, A. V. Heat And Mass Transfer. Reference [Text] / A. V. Lykov. – M. : Energiya, 1978. – 480 p.

11 Rykalin, N. N. Thermal welding basics. H. 1. Diffusion processes in arc welding [Text] / N. N. Rykalin. – M: Publishing House AN SSSR, 1947. – 272 p.

12 Antoshin E. V. Thermal spraying coating [Text] / E. V. Antoshin. – M. : Engineering, 1974. – 96 p.

13 Isachenko, V. P. Jet cooling [Text] / V. P. Isachenko, V. I. Kushnyrev. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 216 p.

14 Isachenko, V. P. Heat transfer: textbook for high schools, 3 Edition, revised and expanded [Text] / V. P. Isachenko and other. – M. : Energiia, 1975. – 488 p.