

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

UDC 621.793.74: 621.791.927.55

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ДЕТАЛИ В  
КОМБИНИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ  
ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ И  
УПРОЧНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ**

**COMPUTER MODELLING OF HEAT  
EXTENSION IN A DETAIL IN THE  
COMBINED PROCESS OF PLASMA  
SPRAYING AND STRENGTHENING OF  
PLASMA COATING**

Кадырметов Анвар Минирович  
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и  
эксплуатации машин

Kadyrmetov Anvar Minirovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor

Никонов Вадим Олегович  
аспирант  
*ФГБОУВПО "Воронежская государственная ле-  
сотехническая академия", Воронеж, Россия*

Nikonov Vadim Olegovich  
postgraduate  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

Разработана методика моделирования распростра-  
нения тепла в детали для способа нанесения плаз-  
менного покрытия в комбинации с электромеха-  
нической обработкой и охлаждением водяной  
струей. Показано, что водяное охлаждение суще-  
ственно понижает температуру поверхности дета-  
ли, и способствует образованию более прочного  
покрытия благодаря уменьшению внутренних  
напряжений в покрытии

The modeling method of heat extension in a detail in  
the combined process of plasma spraying coating with  
electromechanical treating and cooling by water jet is  
worked out. It is shown, that water cooling essentially  
decreases detail surface temperature and forms more  
strong coating thank to reduction of inner strains in  
the coating

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, ДЕТАЛЬ,  
ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ

Keywords: MODELING, HEAT PROCESSES,  
DETAIL, PLASMA COATING

Одним из эффективных методов восстановления поверхностей деталей является плазменное нанесение покрытий с сопутствующей электромеханической обкаткой роликом. Однако при плазменном нанесении и электромеханической обработке многослойных покрытий поверхность детали нагревается до высоких температур. Из-за этого покрытие, нанесенное на горячую деталь, при охлаждении испытывает существенные внутренние напряжения и может отслоиться или потрескаться. Для исключения перегрева детали нами предложен способ комбинации плазменного нанесения покрытия, электромеханической обработки и последующего водяного охлаждения линии прохода плазмотрона. Схема способа комбинированного нанесения покрытия показана на рисунке 1.

Целью данной работы была разработка математической модели, позволяющей имитировать тепловые процессы, происходящие в детали и окружающей среде в данном способе нанесения покрытия, а также оценка, на основе модели, эффективности охлаждения детали.

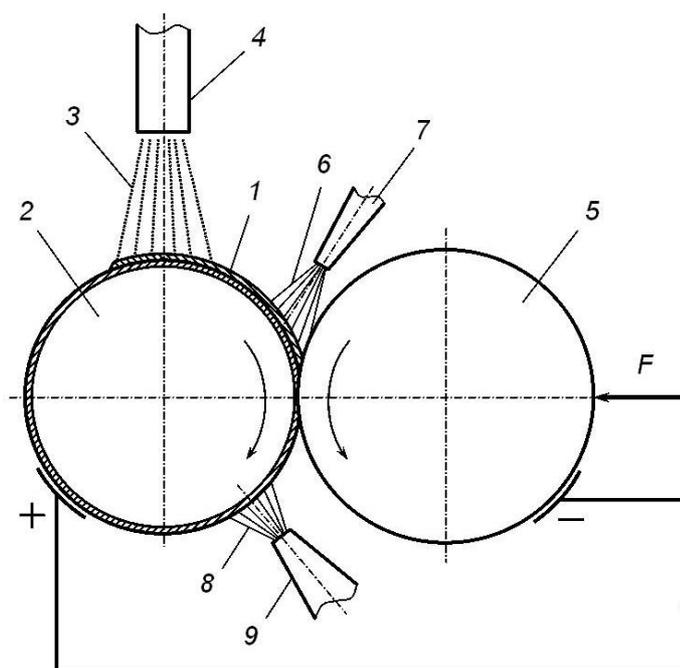


Рис. 1. Схема комбинированного нанесения покрытия: 1 – покрытие; 2 – деталь; 3 – плазменная струя; 4 – плазматрон; 5 – ролик; 6, 8 – охлаждающая струя; 7, 9 – форсунки;  $F$  – сила прижима ролика

Моделирование распространения тепла при способе комбинированного нанесения покрытия является чрезвычайно сложной задачей [1, 2]. Сложность обусловлена необходимостью воспроизведения реальной формы детали (в простейшем случае цилиндрического вала, в более сложном случае – коленчатого вала и других деталей); необходимостью представления как минимум двух сред (материал детали и окружающий её атмосферный воздух); сложностью граничных условий и динамикой (пятна нагрева и охлаждения перемещаются по детали с течением времени).

Модель основана на базовых уравнениях классической термодинамики. При этом сложность задачи преодолевается использованием дискретизации пространства (и соответственно ориентацией на численные методы расчета), а также использованием алгоритмизации и программирования для учета сложных внешних условий [2, 3]. В трехмерном случае распространение тепла описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = (\nabla, c(\mathbf{r}, t) \nabla T(\mathbf{r}, t)) + Q(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

где  $T(\mathbf{r}, t)$  – распределение температуры в пространстве и его изменение с течением времени;  $\mathbf{r}$  – радиус вектор исследуемой точки пространства;  $t$  – время;  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$  – дифференциальный оператор набла;  $x, y, z$  – декартовы координаты исследуемой точки пространства;  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – единичные векторы в декартовом пространстве;  $(\ , \ )$  – скалярное произведение;  $c(\mathbf{r}, t)$  – коэффициент температуропроводности вещества (в общем случае зависит от положения в пространстве и времени);  $Q(\mathbf{r}, t)$  – изменяющееся с течением времени тепловое поле от источников нагрева и охлаждения в данной схеме нанесения покрытия. Коэффициент температуропроводности может быть выражен через коэффициенты теплопроводности  $\kappa$ , теплоемкости  $c$  и плотность вещества  $\rho$  следующим образом:  $\chi = \kappa / (c \cdot \rho)$  [2].

Из-за чрезвычайной сложности уравнения (1), оно допускает аналитическое решение лишь в простейших, оторванных от реальности, случаях (одномерное приближение, строго цилиндрическая форма вала, постоянный коэффициент  $\chi$  и т. д.). Поэтому для исследуемой в настоящей работе схеме плазменного напыления, являющейся сложнейшим для моделирования объектом, решение уравнения (1) ориентируется на использование сеточных конечно-разностных численных методов [3, 4].

Для достаточно адекватной передачи в модели формы детали пространство, в котором производится моделирование, дискретизировано прямоугольной сеткой с шагом  $h = 1$  мм (рис. 2, а). Протяженность пространства в каждом из трех пространственных направлений  $X, Y, Z$  составляет 100 ячеек сетки (соответствует размеру 100 мм). При этом общее количество ячеек составляет  $100^3 = 1\ 000\ 000$ .

Сетка для решения уравнения теплопроводности имеет следующий вид

(рис. 2, б). Каждый узел сетки имеет шесть соседних узлов, от которых возможен прием тепла (либо которым производится передача тепла). В конечно-разностной постановке задачи уравнение (1) преобразуется следующим образом. Для каждого узла  $(i, j, k)$  на каждом шаге интегрирования температура  $T_{i,j,k}$  зависит от температуры соседних узлов следующим образом.

$$\frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta t} = c_{i,j,k} \left( \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta z} \right) + Q_{i,j,k}. \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$  – шаг дискретизации пространства;  $\chi$  – коэффициент температуропроводности;  $Q_{i,j,k}$  – поступление тепла от внешней среды к данной ячейке. Расписывая подробно конечные разности в (2) получим следующую окончательную формулу для теплового расчета [4].

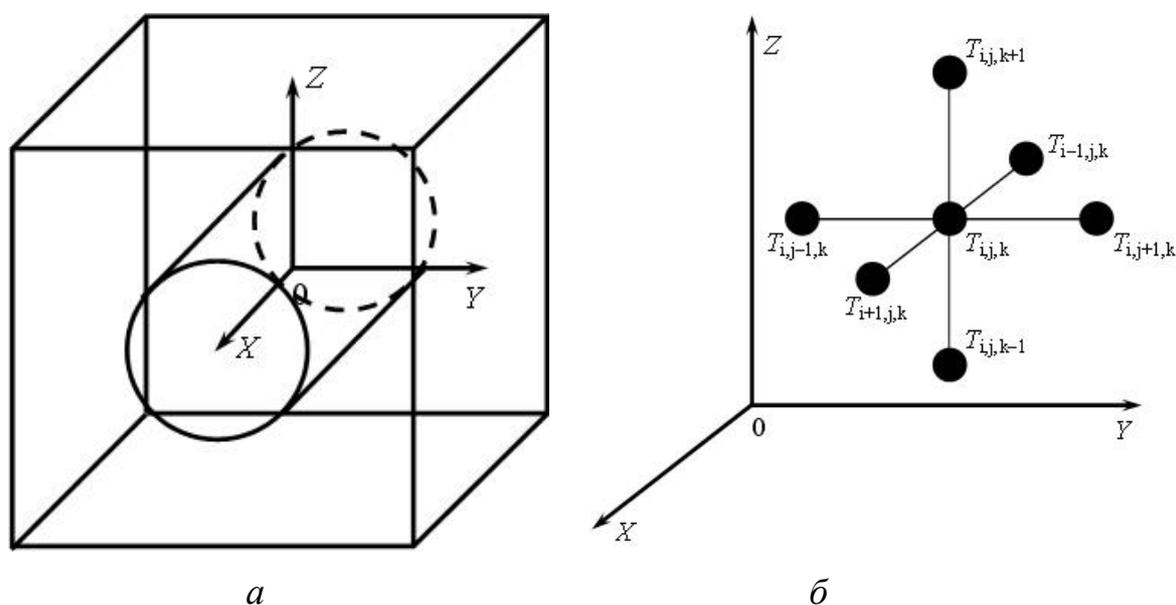


Рис. 2. Представление геометрической области вала в модели (а) и крестообразная схема учета соседних узлов при сеточном решении уравнения теплопроводности (б)

$$\frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} = \frac{c_{i,j,k}}{h} (T_{i+1,j,k}^t + T_{i-1,j,k}^t + T_{i,j+1,k}^t + T_{i,j-1,k}^t + T_{i,j,k+1}^t + T_{i,j,k-1}^t - 6 \cdot T_{i,j,k}^t) + Q_{i,j,k}. \quad (3)$$

Последняя формула позволяет рассчитать температуру  $T_{i,j,k}^{\tau+1}$  каждой

ячейки  $(i, j, k)$  для следующего шага интегрирования по времени  $\tau + 1$  на основе текущей температуры  $T_{i,j,k}^{\tau}$  текущего шага интегрирования  $\tau$ .

Задача распространения тепла решается для сред двух типов: металла вала ( $\chi = 0,25$  Вт/(м·К)) и газа, окружающего вал ( $\chi = 0,026$  Вт/(м·К)). В начальный момент времени все узлы сетки имеют одну и ту же, комнатную, температуру ( $T = 20$  °С). В отличие от реального процесса нанесения покрытия, в модели деталь является неподвижной, а пятна нагрева и охлаждения, представляющие систему нанесения покрытия, движутся вокруг детали в плоскости  $x = 0$ .

Для удобства моделирования разработана компьютерная программа "Программа для моделирования тепловых процессов в деталях машин при комбинированном способе нанесения покрытий" на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7 (рис. 3, 4). Программа предназначена для моделирования тепловых процессов в деталях произвольной геометрической формы при нагреве их струей плазмы и теплом от зоны электромеханической обработки, и при одновременном охлаждении жидкостью. Программа позволяет задавать радиус цилиндрического вала, размер пятен нагрева и охлаждения, частоту вращения вала, скорость передачи и отбора температуры, а также теплофизические свойства материала детали и окружающей атмосферы (рис. 3). В процессе работы программа непрерывно выводит на экран две карты и график распределения температуры в сечениях детали, по которым можно судить о характере теплоотвода в детали (рис. 4).

Основные технические ограничения программы: шаг интегрирования дифференциальных уравнений не более 0,01 с; максимальный размер куба дискретизации пространства не более 1 мм. Программа рассчитана на использование компьютера с процессором не ниже Pentium 2,3 ГГц, и объемом оперативной памяти не менее 512 Мбайт. Исходный текст программы имеет объем около 15 кбайт.

**Программа для моделирования тепловых процессов в деталях машин при комбинированном способе нанесения покрытий**

Геометрические и кинематические параметры		Теплофизические параметры	
<input type="text" value="20"/>	Радиус вала, мм	<input type="text" value="0,6"/>	Теплопроводность материала детали, Вт/(м*К)
<input type="text" value="0,02"/>	Частота вращения вала, об/с	<input type="text" value="0,043"/>	Теплопроводность окружающего воздуха, Вт/(м*К)
<input type="text" value="40"/>	Расстояние между пятнами плазмы и охлаждения, град	<input type="text" value="1,5"/>	Теплоемкость материала детали, кДж/(кг*К)
<input type="text" value="3"/>	Диаметр пятна плазменного осаждения, мм	<input type="text" value="0,2"/>	Теплоемкость окружающего воздуха, кДж/(кг*К)
<input type="text" value="4"/>	Диаметр пятна водяного охлаждения, мм	<b>Параметры компьютерного эксперимента</b>	
<input type="text" value="2"/>	Скорость поступления температуры в пятне плазмы	<input type="text" value="0,1"/>	Шаг интегрирования, мин
<input type="text" value="0,5"/>	Скорость отбора температуры в пятне охлаждения		

Начать компьютерный эксперимент

Рис. 3. Форма ввода исходных данных для компьютерного эксперимента в программе для моделирования тепловых процессов в деталях машин при комбинированном способе нанесения покрытий

Параметры компьютерной модели были близки к следующим реальным параметрам процесса нанесения покрытия: подложка – сталь; порошок ПН55Т45; диаметр частицы порошка (элемента модели) 10 мкм; эффективный радиус ролика 10 мм; характерная толщина одного слоя покрытия 50 мкм; скорость перемещения плазмотрона и ролика относительно поверхности 1 см/с; расход порошка 10 мг/с; характерное давление ролика 100 МПа.

С помощью разработанной модели были проведены пять компьютерных экспериментов для имитации основных вариантов работы системы плазменного напыления (рис. 5):

1) плазменное нанесение покрытия без электромеханической обработки и без охлаждения (карта распределения температуры приведена на

рисунке 5, а;

2) плазменное нанесение покрытия без электромеханической обработки и с охлаждения струей воды (рис. 5, б);

3) плазменное нанесение покрытия с электромеханической обработкой и без охлаждения (рис. 5, в);

4) плазменное нанесение покрытия с электромеханической обработкой и с охлаждением струей воды после прохода пятна плазмотрона;

5) плазменное нанесение покрытия с электромеханической обработкой и с охлаждением струями воды как после прохода пятна плазменного напыления, так и после прохода обкатывающего ролика (рис. 5, в).

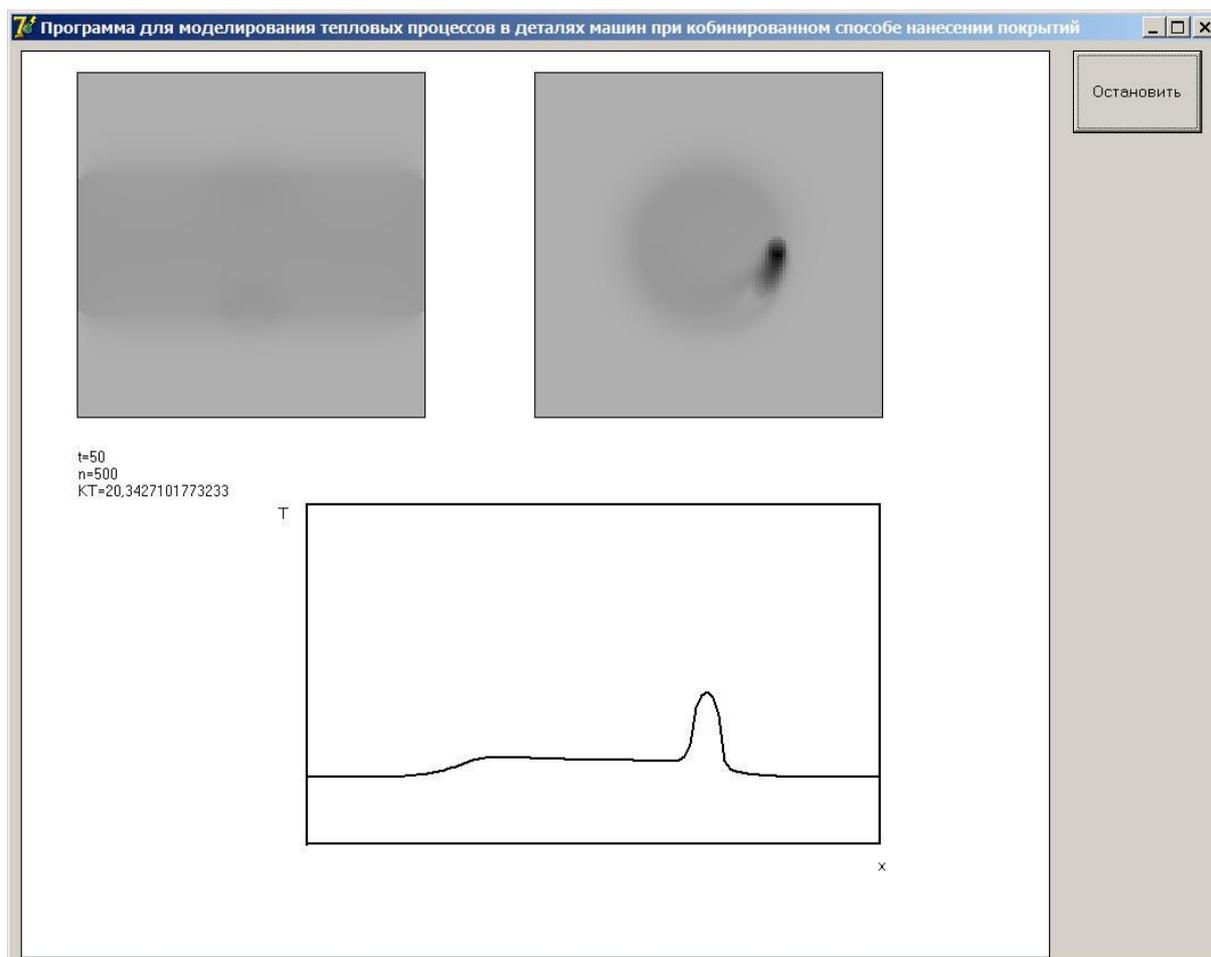


Рис. 4. Вывод результатов компьютерного эксперимента в программе для моделирования тепловых процессов в деталях машин при комбинированном способе нанесения покрытий

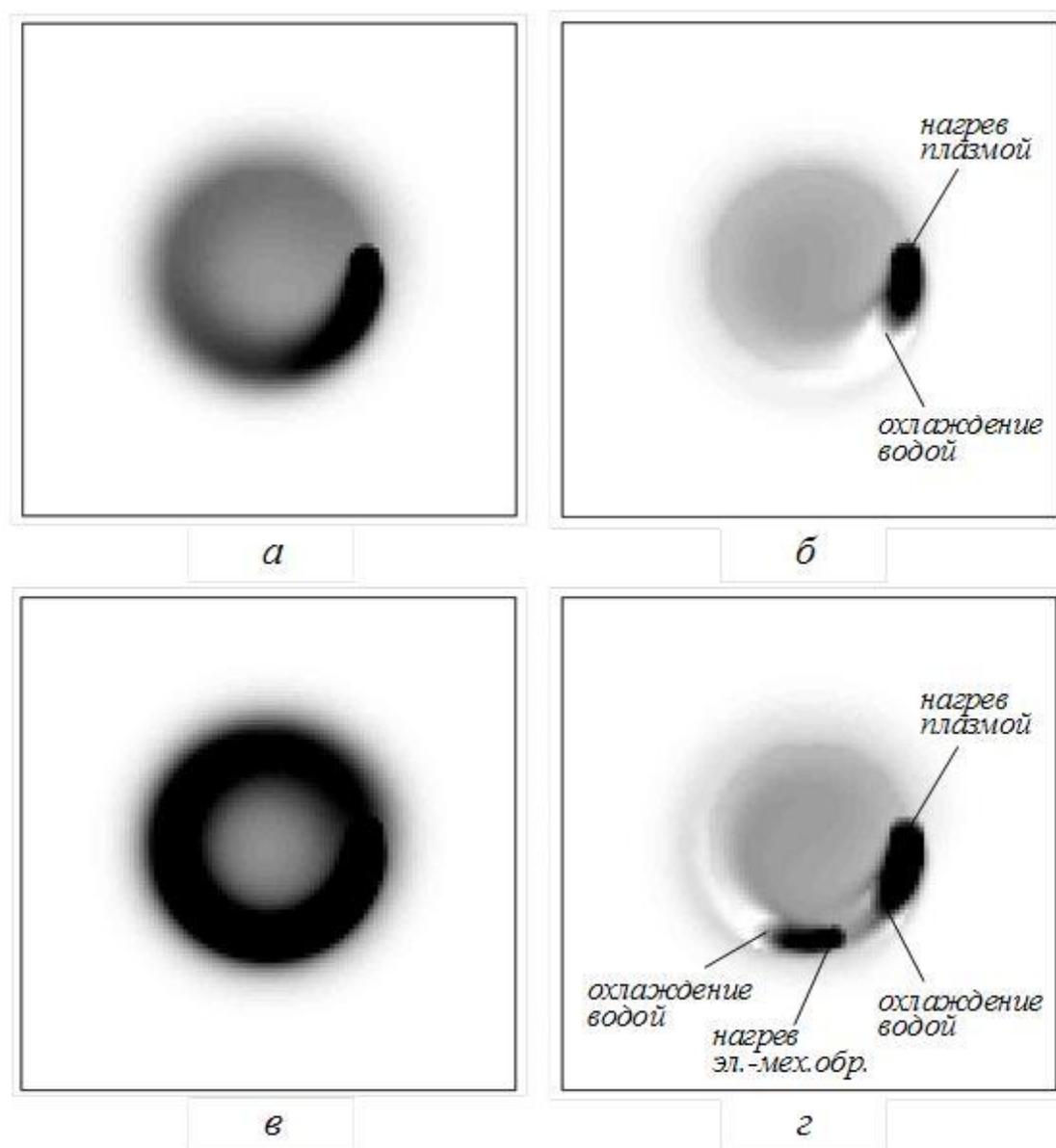


Рис. 5. Иллюстрация улучшения охлаждения поверхности детали: карты распределения температуры в поперечном сечении шейки коленчатого вала для случаев плазменного напыления: *а, в* – без водяного охлаждения; *б, г* – с охлаждением вала одной или двумя водяными струями; *а, б* – без электромеханической обработки; *в, г* – с электромеханической обработкой

На картах распределения температуры (рис. 5) уровень затемнения пропорционален температуре (по шкале Цельсия).

В случае отсутствия охлаждения деталь, и особенно ее поверхность, нагреваются до высоких температур, около 600 °С (рис. 5, *а, в*). При этом охлаждение детали после нанесения покрытия может привести к растрескиванию и отслаиванию покрытия. Если же после прохода пятна плазмы по этой же линии

направляется струя воды под высоким давлением, деталь в целом незначительно нагревается, а поверхность нагревается еще меньше, остывая после контакта с жидкостью до довольно низкой температуры около 200 °С (рис. 5, б). В случае же использования сопутствующей электромеханической обработки две струи воды (за пятном плазмы и за пятном контакта с роликом) также эффективно охлаждают поверхность детали до температур порядка 150 °С (рис. 5, з).

Для количественного анализа распределения температуры в детали построены серии профилей температуры (рис. 6-8).

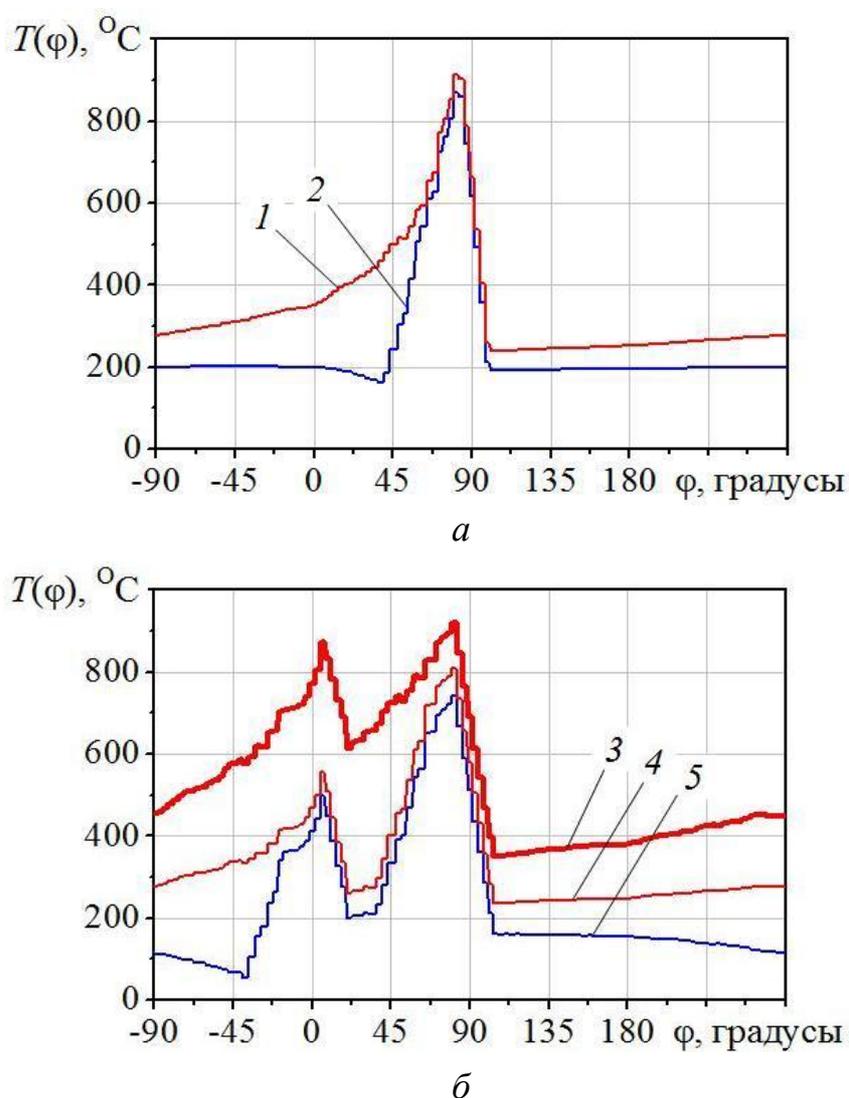


Рис. 6. Угловое распределение температуры по поверхности вала при плазменном нанесении покрытия без (а) и с дополнительной электромеханической обработкой (б): 1-5 – номер компьютерного эксперимента

Анализируя случаи нанесения покрытия без дополнительной электро-механической обработки (линии 1 и 2 на рисунках 6-8, *а*), можно сделать вывод, что охлаждение струей воды приводит к снижению средней температуры поверхности детали вдоль линии движения плазмотрона на 50-200 °С.

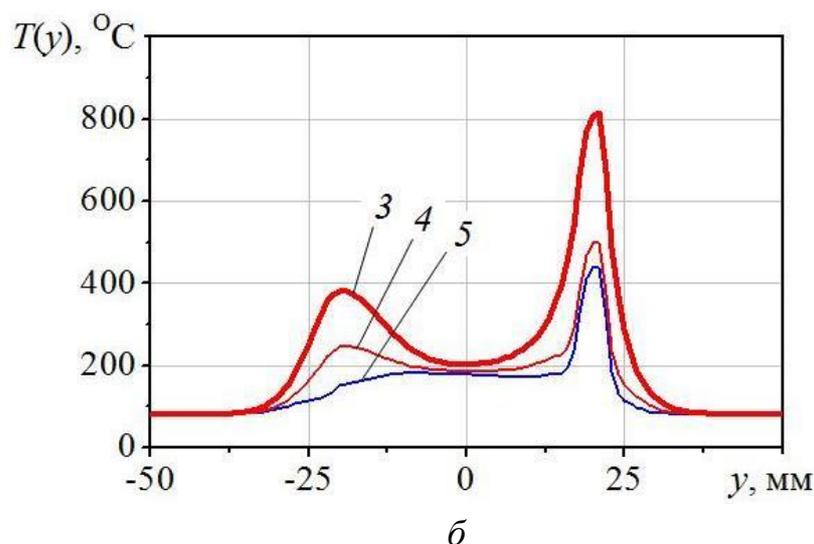
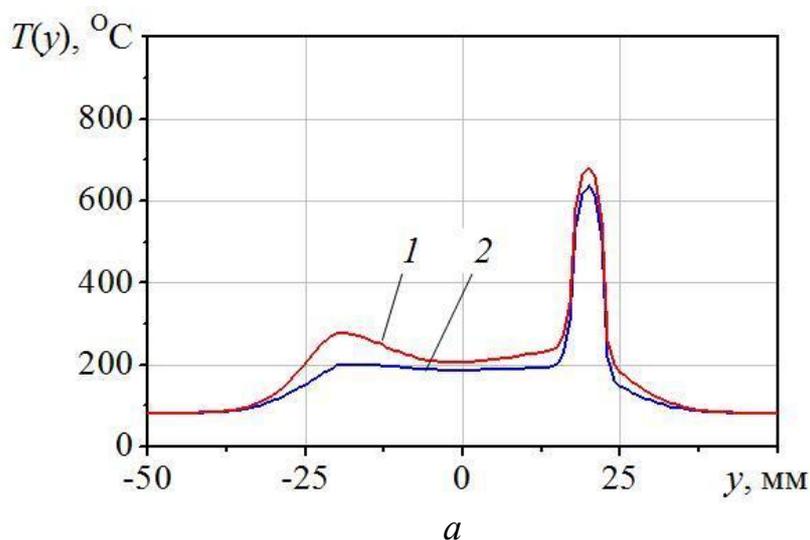


Рис. 7. Распределение температуры в поперечном сечении вала (в области "пятна нагрева плазмой") при плазменном нанесении покрытия без (*а*) и с дополнительной электро-механической обработкой (*б*): 1-5 – номер компьютерного эксперимента

В случае проведения дополнительной электро-механической обработки с пропусканием значительных токов, нагрев детали существенно увеличивается. В случае отсутствия водяного охлаждения средняя температура поверх-

ности при электромеханической обработке приблизительно на 200 °С выше, чем в случае отсутствия таковой. В то же время, использование двух струй водяного охлаждения (как после прохода плазмотрона, так и после прохода обкатывающего ролика), позволяет поддерживать среднюю температуру детали на приемлемом уровне (около 150 °С). Такая довольно низкая средняя температура покрытия не приводит к образованию существенных внутренних напряжений в окончательно сформированном покрытии. Поэтому в данном случае вероятность отслоения и растрескивания покрытия гораздо ниже, чем в случае отсутствия одного или двух этапов охлаждения.

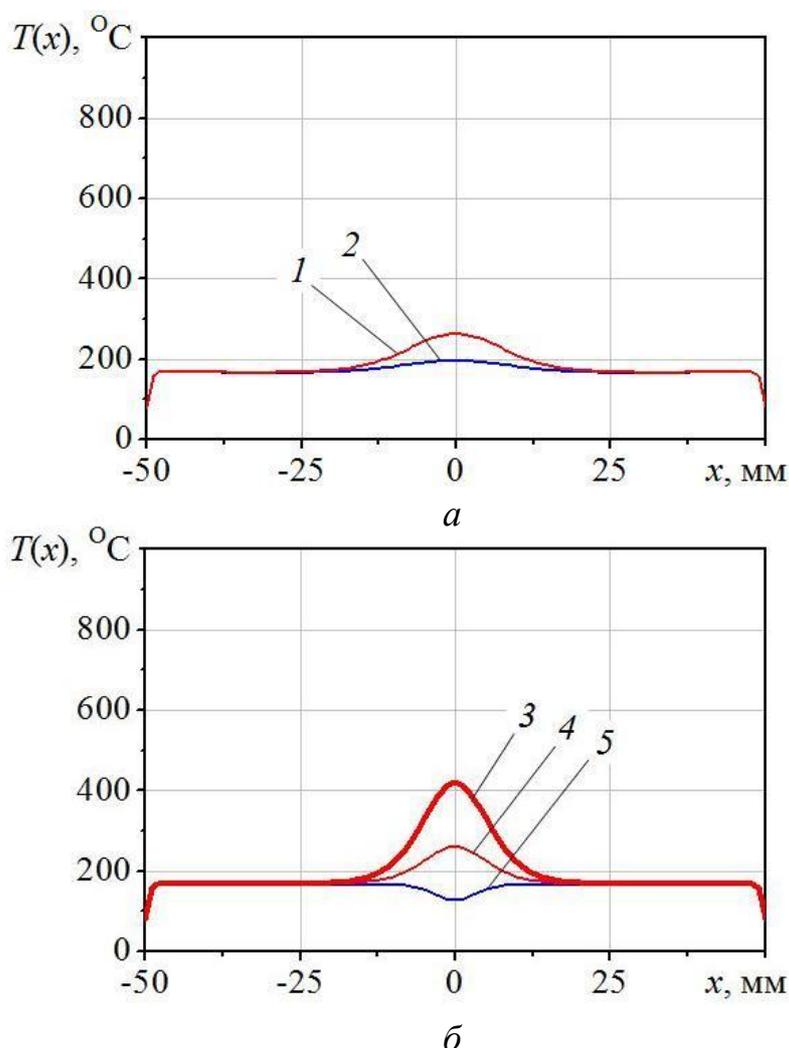


Рис. 8. Распределение температуры на поверхности вала в продольном направлении (с обратной стороны от пятна плазмотрона) при плазменном нанесении покрытия без (а) и с дополнительной электромеханической обработкой (б): 1-5 – номер компьютерного эксперимента

Анализируя профили на рисунке 6 можно прийти к выводу, что каждая струя водяного охлаждения приводит к снижению средней температуры вдоль линии движения плазматрона приблизительно на 150-200 °С.

Таким образом, в рамках данной работы разработана методика (и соответствующая компьютерная программа) моделирования распространения тепла в деталях для способа комбинированного нанесения покрытия. Показано, что водяное охлаждение существенно понижает температуру поверхности детали, чем способствует образованию более прочного покрытия благодаря уменьшению внутренних напряжений в покрытии. В случае использования дополнительной электромеханической обработки поверхности целесообразно использовать две водяные струи охлаждения: после прохода плазматрона и после прохода обкатывающего ролика.

#### Список литературы

- 1 Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учебное пособие – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.
- 2 Полянин А. Д. Линейные задачи тепло- и массопереноса: Общие формулы и результаты // Теоретические основы химической технологии. – 2000. Т. 34. – № 6. – С. 563-574.
- 3 К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах / Н. Н. Гринчик, П. В. Акулич, П. С. Куц, Н. В. Павлюкевич, В. И. Терехов // Инженерно-физический журнал. 2003. – Т. 76. – №6. – С. 129-142.
- 4 Инженерные расчеты на ЭВМ: Справочное пособие / Под ред. В. А. Троицкого. – Л.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

#### References

- 1 Sovetov B.Y., Yakovlev S.A. Modeling of systems: a training manual – 1988. – 319 p.
- 2 Polyandin A.D. Linear problems of heat and mass transfer: Common formulas and results // Theoretical fundamentals of chemical technology. – 2000. Vol. 34. – № 6. – P. 563-574.
- 3 The problem of non-isothermal mass transport in porous media / N. N. Grinchik, P. V. Akulich, P. S. Kuts, N. V. Pavlyukevich, V. I. Terekhov // Journal of Engineering Physics. 2003. – Vol. 76. – № 6. – P. 129-142.
- 4 Engineering calculations on computer: Reference manual / Ed. V. A. Troitckogo – L.: Engineering, 1979. – 288 p.