

Модель процесса напыления с одновременным оплавлением плазменных самофлюсующихся покрытий выносной дугой

И.Н. Кравченко, д-р техн. наук, профессор
(тел. 8 (985) 994-02-20; E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru,
Российский государственный аграрный университет

– МСХА им. К.А. Тимирязева)

А.А. Пузряков, канд. техн. наук
(тел. 8 (901) 513-55-37; E-mail: giperon@rambler.ru,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

А.А. Коломейченко, аспирант

(тел. 8 (967) 076-24-36; E-mail: kolom.anastasiya@gmail.com,

Российский государственный аграрный университет

– МСХА им. К.А. Тимирязева)

Д.М. Бутенко, аспирант

(тел. 8 (985) 199-48-13; E-mail: fireblade2@bk.ru,

Российский государственный аграрный университет

– МСХА им. К.А. Тимирязева)

Аннотация. *Повышение свойств и прочности сцепления плазменных покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля возможно путем оплавления поверхностного слоя при определенной температуре. В работе предложена методика расчета глубины проплавления при напылении самофлюсующихся покрытий выносной дугой с учетом изменения теплопроводности материала от пористости и температуры.*

Ключевые слова: *самофлюсующиеся сплавы, плазменные покрытия, упрочняющие технологии, выносная дуга, прочность сцепления, термообработка.*

Долговечность и другие эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов в значительной мере определяются химическим и физическим состоянием поверхностных слоев, упрочнение которых значительно повышает ресурс работы деталей. Одним из наиболее прогрессивных и эффективных направлений упрочняющей технологии является нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности деталей машин и механизмов [1, 2, 3].

Широкое применение в различных отраслях машиностроения нашли покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе никеля [4, 5]. Газотермические (плазменные) покрытия Ni-Cr-B-Si применяются для повышения износостойкости деталей машин. Для улучшения эксплуатационных свойств детали с покрытием изделия подвергают оплавлению.

Для того чтобы оплавленные покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе Ni-Cr-B-Si отвечали требуемым триботехническим свойствам, процесс оплавления поверхностного слоя необходимо проводить при строго определенной температуре ($T = 1000-1373$ K), так как материалы данных покрытий относятся к сплавам эвтектического типа и очень чувствительны к условиям термообработки [6, 7, 8]. Процесс оплавления проводят различными способами: напыление с последующим оплавлением газовым пламенем, воздушной плазменной струей. Наиболее эффективный и экономичный метод – процесс плазменного напыления покрытий с выносной дугой, основой которого является использование проводящих свойств струи плазмы. Плазма – это ионизированный газ, который обладает областью электрической

проводимости. Эта область существует на ограниченной длине, зависящей от окружающей среды, мощности плазмотрона, степени турбулентности потока газа, рода плазмообразующего газа и ряда других факторов.

Обычный технологический процесс плазменного оплавления (рис. 1, а) происходит на расстоянии $H = 0,05-0,15$ м от среза сопла плазмотрона до поверхности детали, а зона проводимости не касается поверхности.

Между электродами 2 и 4 плазмотрона в потоке плазмообразующего газа возбуждается электрическая дуга 5, являющаяся нагрузкой источника питания 1 (ИП-1). Нагреваясь, газ частично образует низко ионизированную плазму и, выходя из сопла плазмотрона, переносит на поверхность детали напыляемый материал 3, который вводится в поток газа. Частично оплавленные или расплавленные частицы материала покрытия осаждаются на поверхности детали 6, образуя характерную для напыленных покрытий слоистую структуру 7. Приблизив плазмотрон к поверхности детали на расстояние h_2 до касания проводящей зоны 8 плазмы, и, подключив к плазмотрону и к детали дополнительный источник питания 9 (ИП-2), замыкается электрическая цепь катод плазмотрона – анод плазмотрона – деталь. Схематическое изображение процесса напыления с выносной дугой показано на рис. 1, б.

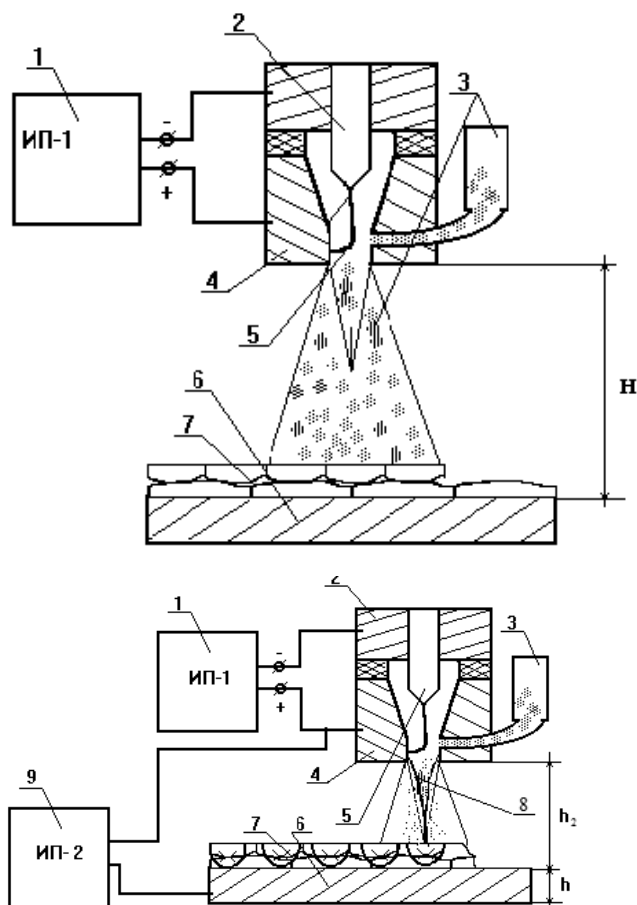


Рис. 1. Физическая модель плазменного напыления покрытий: а) традиционный метод напыления; б) напыление с использованием выносной дуги

Таким образом, представленный на рис. 1, б процесс напыления покрытий с выносной дугой, характеризуется большим вводом тепла и большей прочностью оплавленного слоя за счет локального приваривания участков покрытия к поверхности детали, чем при классическом способе плазменного напыления. С другой стороны, отсутствует общая сварочная ванна и на поверхность детали воздействует меньший тепловой поток, по сравнению с процессом плазменной наплавки.

Рассматриваемый процесс занимает промежуточное положение между процессами напыления и наплавкой, как по прочности образовавшегося покрытия, так и по меньшему тепловому воздействию на деталь.

Результаты испытаний показывают [9, 10], что процесс оплавления покрытий на основе Ni-Cr-B-Si выносной дугой позволяет целенаправленно влиять на формирование структуры и триботехнические свойства напыленных покрытий.

Для того чтобы химический состав напыленного слоя находился на заданном уровне, проплавление должно быть оптимальным.

Традиционная схема расчета проплавления, не учитывающая изменение коэффициента теплопроводности от температуры и пористости, приводит к неправильному назначению режимов термической обработки самофлюсующихся покрытий на основе никеля.

На рис. 2, а показан непроплавленный слой покрытия, т. е. подводимое количество теплоты Q было недостаточно для полного оплавления покрытия. В то же время при подведении большого количества тепла Q происходит ряд отрицательных явлений: объемный разогрев упрочняемых деталей до высоких температур; усиление процессов рекристаллизации и отпуска основы; разупрочнение материала подложки и появление высоких остаточных напряжений в оплавленном слое (рис. 2, б). Поэтому очень важно определить параметры режима напыления с выносной дугой, обеспечивающие заданную глубину проплавления подложки.

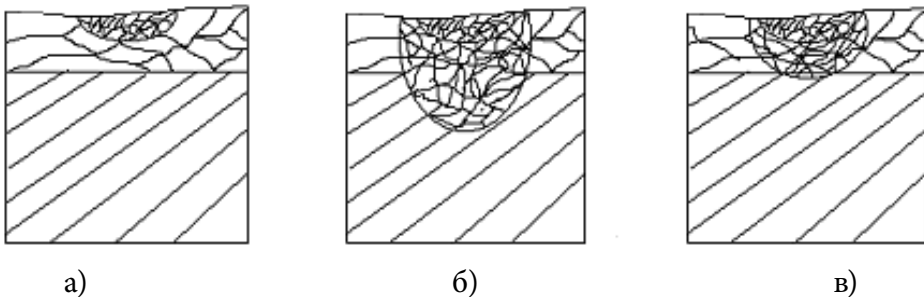


Рис. 2. Микроструктура плазменных покрытий, нанесенных различными методами:

- а) недостаточно оплавленный слой покрытия;
- б) структура наплавленного слоя;
- в) расчетное проплавление мощности выносной дуги

Математическая формулировка задачи оплавления плазменного самофлюсующегося покрытия поверхностным нормально распределенным тепловым источником (выносной дугой), перемещающимся в положительном направлении оси X_0 с постоянной скоростью V , имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z_1^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{V}{a} \frac{\partial T}{\partial X_1} - \lambda(T, \dot{i}) \Big|_{Z_1=0} = q_0 \exp[-K(X_1^2 + Y_1^2)]$$

$$T(+\infty, Y_1, Z_1, t) = T(X_1, +\infty, Z_1, t) = T(+\infty, Y_1, X_1, t) = T(X_1, Z_1, Y_1, 0) = T_0$$

..... (1)

где T – температура;

X₁, Y₁, Z₁ – пространственные координаты;

q₀ – плотность потока энергии, которое поглощает тело;

K – коэффициент сосредоточенности источника;

$\lambda(T, \Pi)$ – коэффициент теплопроводности покрытия, зависящий от температуры и пористости;

a – коэффициент температуропроводности;

T₀ – начальная температура.

Используя интегральные преобразования [11, 12, 13], находим решение задачи (1) в виде

$$T(X_1, Y_1, Z_1, t) = T_0 + \frac{q_0 \sqrt{a}}{4\pi K \lambda(T, \dot{i})} \int_0^t \exp \left[\frac{Y_1^2 + [X_1 + V(t_0 - t')]^2}{4[a(t_0 - t') + 1/4K]} - \frac{Z_1^2}{4a(t_0 - t')} \right] \times$$

$$\times \frac{dt'}{a(t_0 - t') \sqrt{t_0 - t'}},$$

(2)

где t₀ – постоянная времени.

Для приближенного вычисления (2) участок интегрирования разбивается на несколько отрезков и на каждом отрезке аппроксимируется простой функцией, а затем эти функции интегрируются.

В результате решения данной задачи с учетом изменения теплопроводности от пористости и температуры построены изотермы [14, 15], которые используются для расчета режимов напыления и оплавления покрытий Ni-Cr-B-Si выносной дугой. При этом авторами экспериментально установлены значения коэффициентов теплопроводности для самофлюсующихся сплавов на основе никеля (рис. 3).

Использование полученной зависимости позволяет точнее выбрать мощность выносной дуги. Расхождение полученных расчетных данных с экспериментальными данными составило менее 10% (рис. 4).

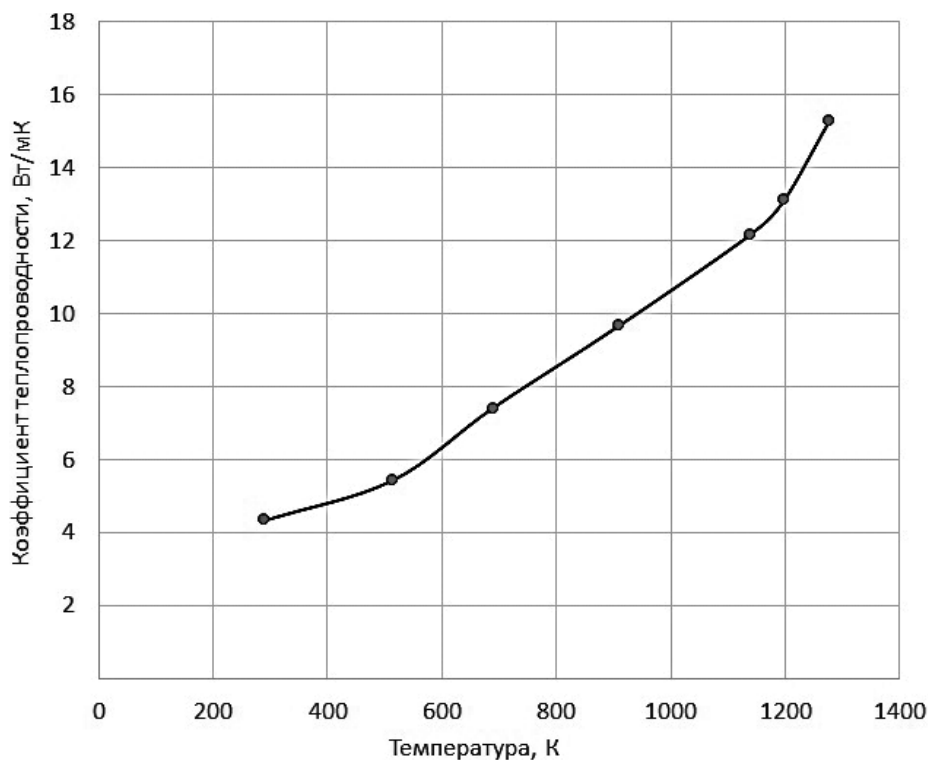


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности для самофлюсующихся сплавов на основе никеля

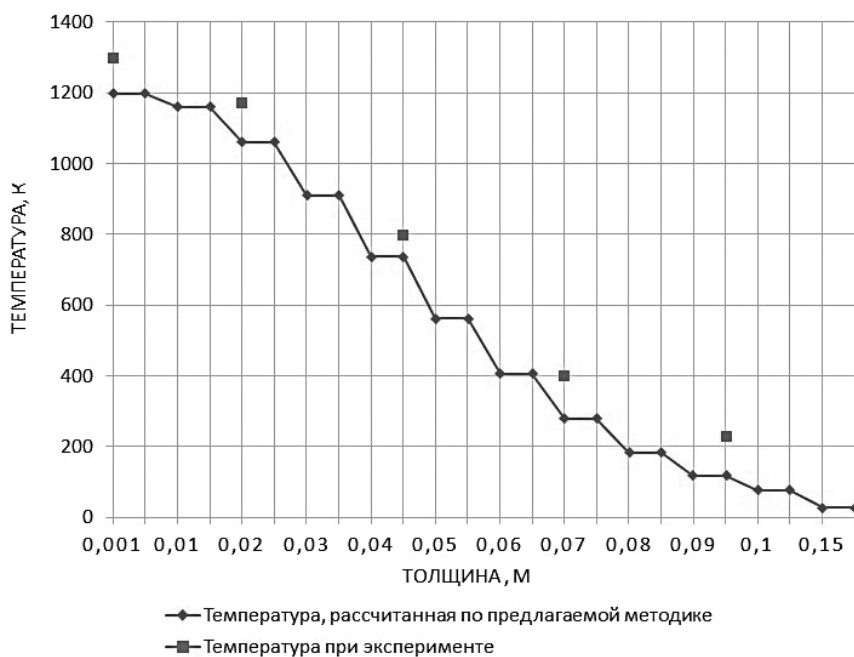


Рис. 4. Распределение температуры в зависимости от толщины. Таким образом, предложенная методика позволяет сократить количество экспериментов по подбору режимов, повысить качество и стабильность свойств покрытий, напыленных выносной дугой.

Литература

1. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
2. Пузряков А.Ф. Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности: монография / А.Ф. Пузряков, И.Н. Кравченко, И.К. Соколов [и др.]. – М.: Изд-во Эко-Пресс, 2013. – 300 с.
3. Пузряков А.Ф., Кравченко И.Н., Коломейченко А.А., Путырская М.Ю., Осипков А.С. Новые подходы к повышению ресурса деталей машиностроения методами газотермического напыления наноструктурированных материалов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 6. – С. 32-35.
4. Подзоров В.Д., Харченков В.С., Кадин А.И. Исследование теплопроводности газотермических покрытий Ni-Cr-B-Si // Порошковая металлургия. – 1991. – №8. – С. 22-23.
5. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Бобряшов Е.М. Структура никелевых покрытий, напыленных воздушным потоком плазмы // Технология металлов. – 2014. – № 6. – С. 36-38.
6. Спиридонов Н.В., Протасевич В.А., Самодеева Т.И. Влияние лазерной обработки на структуру и триботехнические свойства плазменных покрытий из самофлюсующихся сплавов // Порошковая металлургия. – 1988. – №1. – С. 11.
7. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Гладков В.Ю., Бобряшов Е.М. Повышение прочности сцепления покрытий с основой совмещенной электроискровой обработкой подложки // Труды Всероссийского научно-исследовательского технологического института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка: Т. 111. – М.: ГОСНИТИ, 2013. – С. 30-35.
8. Коломейченко А.В., Кузнецов И.С., Кравченко И.Н. Толщина и микротвердость покрытий из аморфных и нанокристаллических сплавов, нанесенных электроискровой обработкой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2014. – №10. – С. 45-48.
9. Кравченко И.Н., Гладков В.Ю., Карцев С.В. Анализ структуры и свойств оплавленных самофлюсующихся покрытий // Научно-технический сборник: Юбилейный выпуск. – Балашиха: Изд-во ВТУ, 2002. – С.
10. Кравченко И.Н. Влияние оплавления на формирование структуры и свойства плазменнонапыленных покрытий // Механизация строительства. – 2005. – №12. – С. 14-17.
11. Смуров И.Ю. Нестационарные задачи нагрева и плавления металлов лазерным излучением и плазмой: автореф. дис ... канд. физ.-мат. наук. – М.: ИМЕТ, 1982. – 134 с.
12. Рындин Е.А. Методы решения задач математической физики: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 119 с.
13. Захаров И.Н. Системная постановка и решение задач механики формирования структуры и свойств металлических тел при интенсивных технологических воздействиях: дис ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 2012. – 292 с.
14. Кравченко И.Н. Способ воздействия электрической дуги пульсирующей мощности на прочность сцепления покрытий / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузряков, В.Ю. Гладков // Международный журнал фундаментальных и прикладных исследований. – 2013. – №4. – С. 14-19.
15. Кравченко И.Н. Структура и свойства оплавленных самофлюсующихся покрытий, используемых для повышения износостойкости поверхностей деталей машин / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузряков, М.Ю. Путырская, А.С.

MODEL DEPOSITION PROCESS WITH SIMULTANEOUS FUSION PLASMA REMOTE ARC SELF-FLUXING COATINGS

I.N. Kravchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor
(Russian State Agrarian University – Moscow agricultural
Academy named after Timiryazev)

tel.: 8 (985) 994-02-20; E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

A.A. Puzryakov, Candidate of Technical Sciences
(Moscow State Technical University named after N.E. Bauman)

tel.: 8 (901) 513-55-37; E-mail: giperon@rambler.ru

A.A. Kolomeychenko, graduate student
(Russian State Agrarian University – Moscow agricultural
Academy named after Timiryazev)

tel.: 8 (967) 076-24-36; e-mail: kolom.anastasiya@gmail.com

D.M. Butenko, graduate student
(Russian State Agrarian University – Moscow agricultural
Academy named after Timiryazev)

tel.: 8 (985) 199-48-13; e-mail: fireblade2@bk.ru

Annotaition. *Improving the properties and adhesion of plasma coatings from self-fluxing nickel-based alloys is possible by melting of the surface layer at a certain temperature. The paper presents the method of calculating the depth of penetration during the deposition of self-fluxing coatings remote arc taking into account changes in the thermal conductivity of the material on the porosity and temperature.*

Keywords: *self-fluxing alloys, plasma coating, reinforcement technology, the extended arc, bonding strength, heat treatment.*