

стях контакта, где имеет место максимальная концентрация бора. Выдержка в печи является предпочтительным вариантом технологии, так как при этом, в отличие от оплавления, отсутствуют порообразование на поверхности покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. - Мн.: ФТИ, Новополоцк: ГТГУ, 1999. – 133 с.
2. Kvist S.A. Hognas invest in the future // Metal Bull. Mon. - 1990, №7, - P. 44-45.
3. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующие диффузионно легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. - Мн.: УП «Технопринт», 2001.-300 с.
4. Моделирование тепловых процессов в частицах порошка высокохромистого чугуна при плазменном напылении / Ю.О. Девойно, А.М. Авсиевич, С.П. Кундас, Д.В. Марковник. Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. - 2005, № 4. – С. 4-6.
5. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. - М.: Атомиздат, 1975.-376 с.

6. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко и др. - Мн.: Бестпринт, 1998 - 212 с.
7. Кундас С.П., Гуревич В.А., Кашко Т.А. Моделирование нагрева частиц порошка в плазменной струе с учетом движения фронтов плавления и испарения // Известия Белорусской инженерной академии. 2000. - №1 (9) / 2. - С. 82-84.
8. Математическая модель процесса плазменного напыления покрытий / Гуревич В.А., Кашко Т.А., Левашкевич Я.С., Кундас С.П. // Физика конденсированных сред: Тезисы докл. VIII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов / Под ред. В.А. Лиопо. - Гродно: ГГУ, 2000. – С. 85-86.
9. Изучение особенностей процесса газотермического напыления покрытий из диффузионно легированных самофлюсующихся порошков на железной основе с применением математического моделирования / А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, С.П. Кундас, В.М. Константинов // Теория и практика машиностроения. - 2003 - № 2. - С. 36-39.
10. Ларииков Л.Н., Исайчев В.И. Диффузия в металлах и сплавах: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1987. - 509 с.
11. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: Металлургия, 1992. - 432 с.

УДК 621.793.72

Кривцун И.В., Кардаполова М.А., Борисов Ю.С., Девойно Ю.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЧУГУННЫХ ПОКРЫТИЙ

Введение

Среди технологических процессов восстановления рабочих поверхностей быстроизнашивающихся деталей большое место занимают методы создания износостойких покрытий газотермическим напылением порошковых материалов. В качестве таких материалов широко используются никелевые самофлюсующиеся сплавы, обладающие наряду с высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств хорошей технологичностью. Однако в ряде случаев применимость таких материалов ограничивается их высокой стоимостью. В последнее время существует тенденция по замене их более дешевыми материалами на железной основе. Еще более выгодным с экономических позиций видится использование в качестве сырья для нанесения покрытий отходов различных машиностроительных и других производств.

Одним из таких материалов являются отходы электроэрозийной обработки порошка высокохромистого чугуна марки ИЧХ28Н2. Ежегодно образующееся количество данного материала приемлемой для газотермического напыления грануляции достаточно для промышленного внедрения на предприятиях процесса восстановления деталей с его использованием. До настоящего времени порошок ИЧХ28Н2 применялся для нанесения покрытий исключительно после дорогостоящего и малопродуктивного процесса диффузионного легирования [1,2].

Предварительные эксперименты показали принципиальную возможность получения покрытий на основе ИЧХ28Н2 в чистом виде (без какой-либо предварительной модифицирующей обработки) путем плазменного напыления. Однако требуется проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для оптимизации процесса формирования покрытий, что является целью настоящего исследования.

Кривцун Игорь Витальевич, д.т.н., ст. научн. сотр., заведующий отделом физики, газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Борисов Юрий Сергеевич, д.т.н., профессор, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Девойно Юрий Олегович, аспирант каф. «Ремонт и эксплуатация автомобилей» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220050, г. Минск, пр-т Независимости, 65.

Моделирование процесса плазменного напыления

Для компьютерного моделирования процесса плазменного напыления была использована математическая модель и программное обеспечение CASPSP [3], позволяющие рассчитывать тепловые и газодинамические характеристики турбулентной плазменной струи, генерируемой плазмотроном с гладким каналом, а также моделировать процессы движения и нагрева в такой струе напыляемых частиц с учетом зависимости их теплофизических свойств от температуры.

Расчет скорости и траектории движения напыляемой частицы проводился на основе уравнений движения, записанных в виде [3]:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}; \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}. \quad (1)$$

Здесь m – масса частицы,

$\mathbf{r}(t) = (x, y, z)$, $\mathbf{v}(t) = (v_x, v_y, v_z)$ – текущие значения радиус-вектора и скорости частицы,

$\mathbf{F}(\mathbf{r})$ – сила, действующая на частицу, находящуюся в струе плазмы.

Уравнения (1) интегрируются при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} x|_{t=0} &= X_0; & y|_{t=0} &= 0; & z|_{t=0} &= Z_0; \\ v_x|_{t=0} &= -v_0; & v_y|_{t=0} &= 0; & v_z|_{t=0} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где X_0, Z_0 – координаты точки выхода частицы из транспортного канала (рис. 1), v_0 – начальная скорость частицы, приобретаемая в потоке транспортирующего газа.

При анализе движения напыляемой частицы будем считать ее сферической, имеющей радиус a , и будем полагать, что на частицу в плазменной струе (потоке газа) действует только сила аэродинамического сопротивления [3]:

$$\mathbf{F} = C_d S \frac{\rho_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) |\mathbf{u} - \mathbf{v}|}{2}. \quad (3)$$

Здесь C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, $S = \pi a^2$ – миделево сечение частицы, $\rho_p(\mathbf{r})$, $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ – плотность и скорость невозмущенного потока плазмы в точке нахождения частицы. Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления сферической частицы воспользуемся критериальными зависимостями [4]:

$$C_d = 24 \text{Re}^{-1}, \text{ при } \text{Re} < 0,2;$$

$$C_d = 24 \text{Re}^{-1} + 3,6 \text{Re}^{-0,317}, \text{ при } 0,2 < \text{Re} < 4;$$

$$C_d = 24 \text{Re}^{-1} + 4 \text{Re}^{-0,333}, \text{ при } 4 < \text{Re} < 400,$$

где $\text{Re} = (\rho_p |\mathbf{u} - \mathbf{v}| 2a) / \eta_p$ – число Рейнольдса, $\eta_p(\mathbf{r})$ – коэффициент динамической вязкости плазмы в точке нахождения частицы.

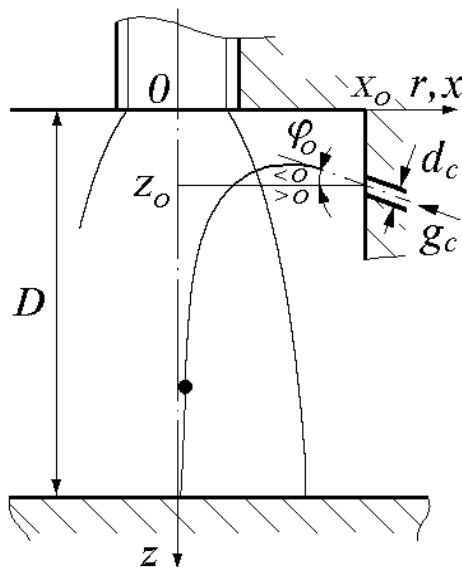


Рис. 1. Схема ввода напыляемой частицы в плазменную струю

Для расчета температурного поля сферической частицы, нагреваемой плазменной струей использовалось нестационарное уравнение теплопроводности. Принимая предположение о сферической симметрии температурного поля частицы и учитывая зависимость свойств ее материала от температуры, это уравнение можно записать в виде

$$\rho \bar{C} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \chi \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (5)$$

Здесь $T(r, t)$ – пространственно-временное распределение температуры в частице (r – расстояние от центра частицы, t – время), $\rho(T)$ – плотность, $\chi(T)$ – коэффициент теплопроводности, $\bar{C}(T)$ – эффективная теплоемкость вещества частицы, вычисляемая с учетом скрытой теплоты плавления W_M и парообразования W_B :

$$\bar{C} = c + W_M \delta(T - T_M) + W_B \delta(T - T_B), \quad (6)$$

где $c(T)$ – удельная теплоемкость материала, T_M и T_B – температуры плавления и кипения соответственно, $\delta(x)$ – дельта-функция.

Начальные и граничные условия к уравнению (5) можно записать в следующем виде:

$$T(r)|_{t=0} = T^0; - \left(\chi \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=a} = q, \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (7)$$

где T^0 – исходная температура частицы; $q(t)$ – текущее значение теплового потока через ее поверхность. В случае плазменного нагрева частиц указанная величина рассчитывается по формуле [1]:

$$q = \alpha(T_p - T_s) + \xi \sigma_0 (T_p^4 - T_s^4). \quad (8)$$

Здесь $T_p(\mathbf{r})$ – температура невозмущенного потока плазмы в точке нахождения частицы; $T_s(t)$ – текущее значение температуры поверхности частицы; α – коэффициент теплообмена; ξ – приведенная степень черноты для системы плазма - поверхность частицы; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана. Коэффициент конвективного теплообмена для сферической частицы может быть вычислен на основе критериальной зависимости для обтекания сферы [4]:

$$\text{Nu} = 2 \frac{\chi_s}{\chi_p} + 0,5 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,4} \left(\frac{\rho_p \eta_p}{\rho_s \eta_s} \right)^{0,2}, \quad (9)$$

где $\text{Nu} = (\alpha 2a) / \chi_p$ – число Нуссельта, $\text{Pr} = (C_p \eta_p) / \chi_p$ – число Прандтля; $\chi_p(\mathbf{r})$, $C_p(\mathbf{r})$ – коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость невозмущенной плазмы в точке нахождения частицы (индексом s обозначены соответствующие свойства плазмы при температуре поверхности частицы).

С использованием указанного программного обеспечения проводилось моделирование процесса плазменного напыления порошка ИЧХ28Н2. на установке УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25. Диаметр плазмоформирующего канала плазмотрона 6 мм, координаты точки ввода порошка (рис. 1) $X_0 = 3$ мм, $Z_0 = 0$, угол ввода $\phi_0 = 0$. Плазмообразующий и транспортирующий газ – азот. Расход плазмообразующего газа – 2 м³/ч. Расход транспортирующего газа – 0,18 м³/ч. Расход порошка – 2 кг/ч. Напряжение дуги 90..100 В. В качестве варьируемых параметров были выбраны: сила тока, диаметр напыляемых частиц (грануляция) и дистанция напыления.

Необходимым условием для прогрева частицы и поддержания ее в жидком состоянии до момента попадания на подложку является обеспечение определенной траектории и скорости ее движения в плазменной струе. Так как частицы вводятся в струю под углом 90° к ее оси, то в зависимости от соотношения расходов плазмообразующего и транспортирующего газов, размеров (a , следовательно, и массы) частиц, дистанции напыления и других факторов, частица попадает на поверхность с определенным осевым отклонением. Зависимость осевого смещения частиц X от их размера представлена на рис. 2.

Приемлемым является диапазон X от -10 до 10 мм. Следовательно, для данной конструкции плазмотрона, типа порошка и условий его ввода наилучший результат может быть достигнут при грануляции порошка, когда средний размер частиц не превосходит определенной величины. Зависимость верхней границы размеров частиц, для которых отклонения от оси лежат в указанном диапазоне, от силы тока изображена на рис. 3.

Таким образом, следует признать пригодной для напыления грануляцию 40..80 мкм (средний размер частиц порядка

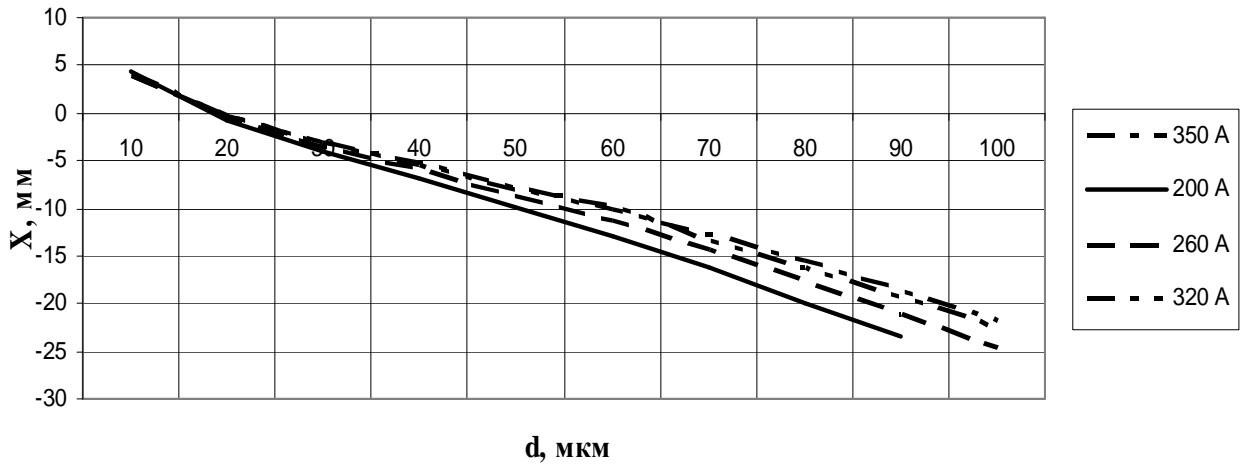


Рис. 2. Зависимость осевого смещения X от размера частицы d

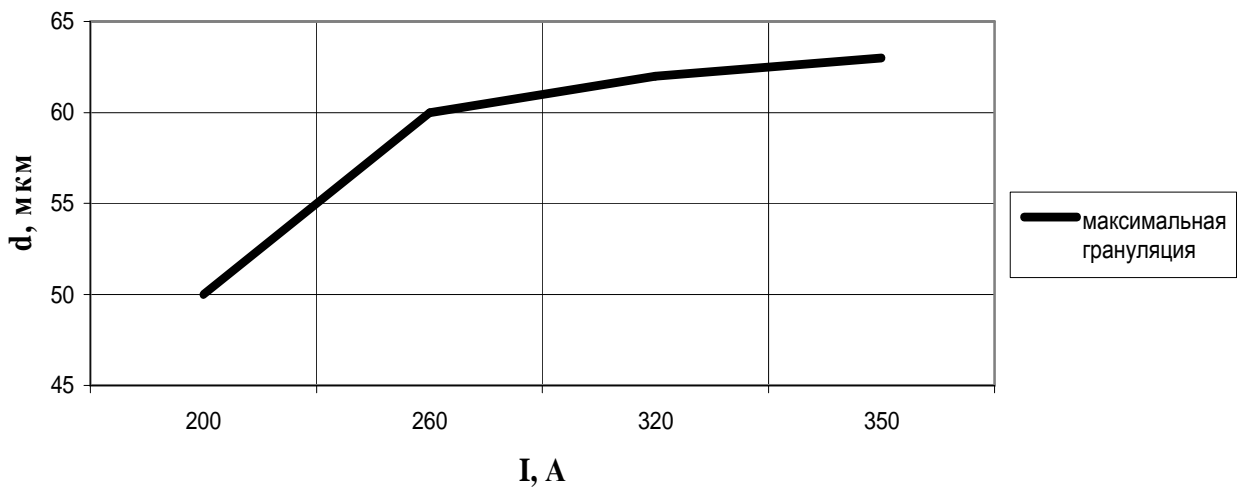


Рис. 3. Рекомендуемый средний размер частиц порошка в зависимости от силы тока

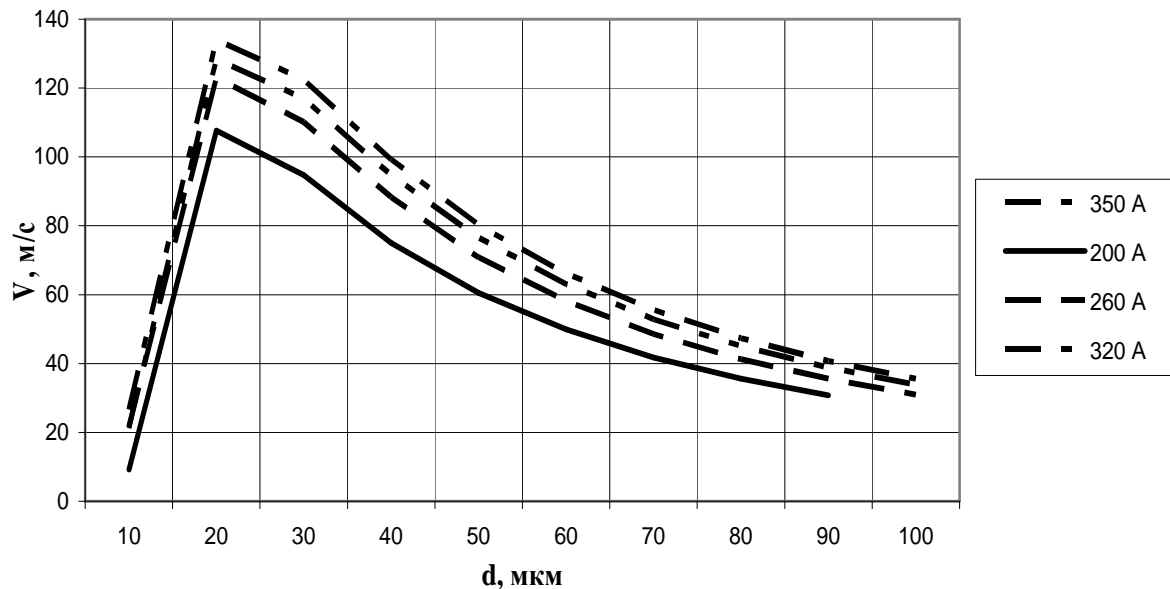


Рис. 4. Зависимость скорости частицы от ее размера

60 мкм). Частицы большего размера и большей массы получают, соответственно, больший импульс в направлении, перпендикулярном оси плазмотрона, и в момент попадания на напыляемую поверхность успевают сместиться на большее расстояние X от оси.

Расчетная зависимость скорости частиц порошка в зоне контакта с поверхностью от их грануляции представлена на рис. 4.

Как видно из приведенных данных, в диапазоне грануляций 40...80 мкм скорость частиц при попадании на поверхность в зависимости от силы тока находится в пределах от 35,6 м/с до

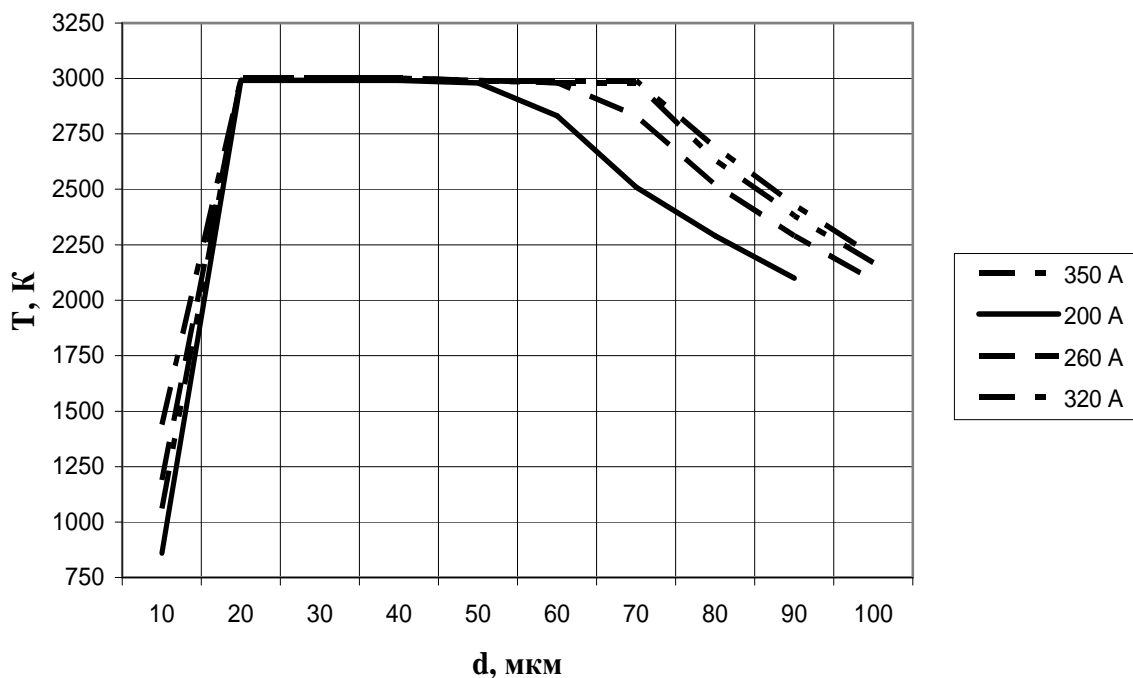
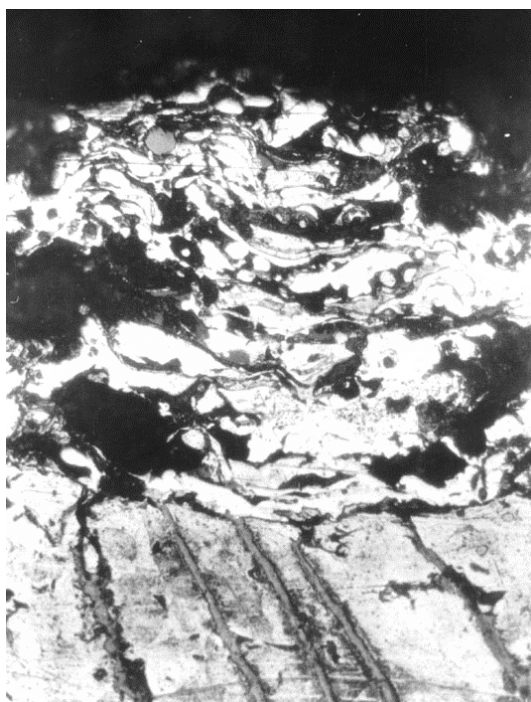


Рис. 5. Зависимость температуры частицы от ее размера

а)



б)



Рис. 6. Структура покрытия на основе ИСХ28Н2 после плазменного напыления: а) при грануляции 80..120 мкм (x 300); б) при грануляции 40..80 мкм

99,2 м/с. Снижение осевой скорости частицы при увеличении ее размера в данном случае можно объяснить тем, что большая частица смещается дальше от оси плазматрона (как показано выше). А в соответствии с распределением скорости по сечению плазменной струи очевидно, что ее величина максимальна на оси и уменьшается по мере удаления от центра.

Важнейшим фактором для формирования покрытия с высокой однородностью и низкой пористостью является температура частицы в момент ее попадания на напыляемую поверхность. Зависимость температуры частицы от ее размера приведена на рис. 5.

Для частиц грануляции 40..80 мкм температура в момент попадания на поверхность находится в пределах от 2290 К до

3000К. То есть частицы попадают на подложку в расплавленном состоянии, что создает условия для формирования качественного покрытия.

Расчеты осевого смещения, температуры и скорости частиц порошка ИСХ28Н2 грануляции 40..80 мкм от дистанции напыления при силе тока 260А показали, что с учетом ранее указанных ограничений оптимальная дистанция напыления составляет 100...120 мм. При этом кроме того учитывалось, что при малом (менее 100 мм) расстоянии от сопла плазматрона до напыляемой поверхности имеет место разогрев обрабатываемой детали (заготовки) из-за длительного теплового воздействия на нее плазменной струи, что чаще всего технологически недопустимо. Кроме того, при малых дистанциях

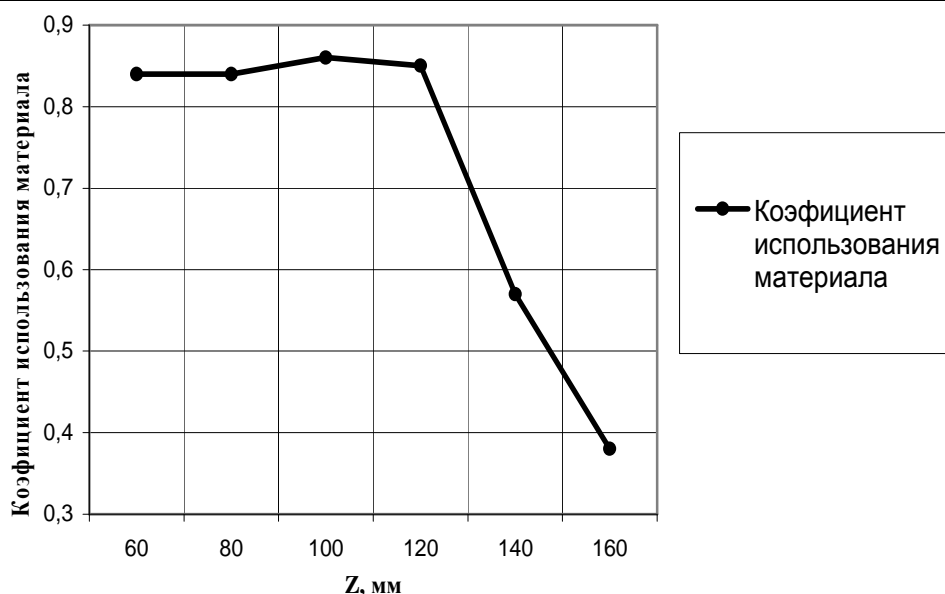


Рис. 7. Зависимость коэффициента использования материала от дистанции напыления

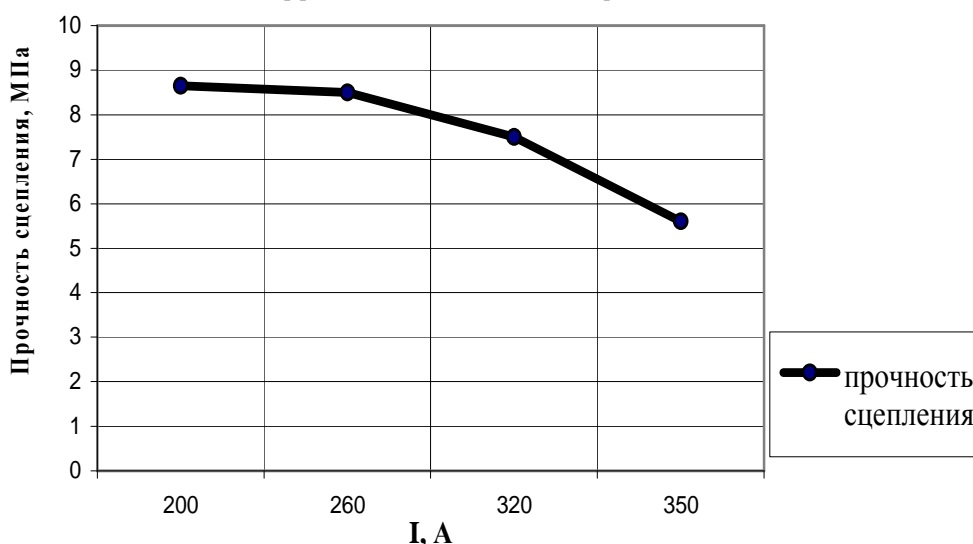


Рис. 8. Экспериментальная зависимость прочности сцепления от силы тока

напыления и маломощном режиме работы плазменной установки, частица не успевает прогреться до температуры плавления и попадает на подложку в твердом состоянии. При больших значениях дистанции напыления увеличивается интенсивность окисления частиц кислородом воздуха, подсаемого в струю.

Таким образом, в результате расчетов, сделанных при помощи программного обеспечения CASPSP, был определен диапазон параметров режимов, в котором целесообразно проводить экспериментальные исследования процесса напыления покрытий из порошка ИЧХ28Н2. При использовании установки УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25 рекомендуется вести напыление на режимах с силой тока порядка 260 А, оптимальный диапазон грануляций порошка 40..80 мкм, дистанция напыления 100..120 мм.

Экспериментальные исследования процесса напыления

Для проверки результатов расчетов была проведена серия экспериментов по нанесению покрытий из порошка ИЧХ28Н2. Напыление проводили на поверхность образцов, предварительно активированную при помощи дробеструйной обработки. В качестве подложки, необходимой для обеспечения приемлемой прочности сцепления покрытия с поверхно-

стью образца [5], использовали слой никелевого самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ толщиной порядка 0,15 мм.

Структура покрытий на основе ИЧХ28Н2 различной грануляции показана на рис. 6.

Для покрытий, нанесенных при силе тока ниже оптимальной (порядка 160-200 А), характерен пониженный коэффициент использования материала, крайне низкая прочность сцепления с подложкой (покрытие отслаивается при остывании детали) (рис. 8). При использовании порошка грануляцией более 80 мкм (рис. 6а) имеет место повышенная пористость. Аналогичный эффект, а также повышенный разлет (уширение зоны напыления), наблюдается и с увеличением дистанции напыления до 140-160 мм. Экспериментальная зависимость коэффициента использования материала от дистанции напыления представлена на рис. 7. Следует отметить, что при дистанции напыления менее 100 мм имел место значительный разогрев образцов, сопровождавшийся последующим отслаиванием нанесенного слоя.

Покрытия, полученные на оптимальных режимах, обладали хорошей однородностью и достаточной для шлифования прочностью сцепления. Однако при других видах механической обработки в большинстве случаев покрытие отслаивалось. Это явление, а также излишне высокая пористость

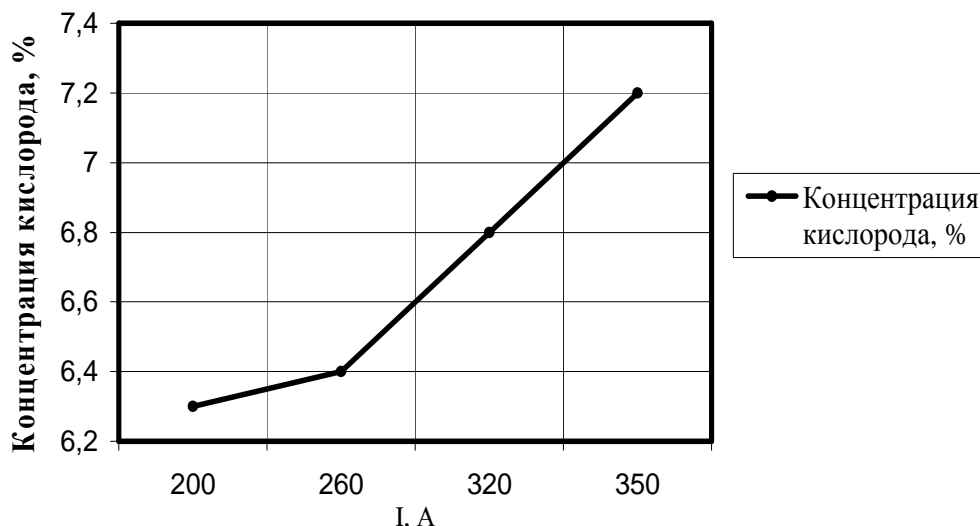


Рис. 9. Экспериментальная зависимость содержания кислорода от силы тока

покрытий объясняется, прежде всего, высокой степенью окисления напыленного порошка, являющегося отходами электроэрозионной обработки [6]. Под воздействием высоких температур процесс окисления частиц порошка интенсифицируется (рис. 9). Этим объясняется тот факт, что при увеличении силы тока прочность сцепления покрытий с подложкой снижается.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные подтвердили корректность указанных численных оценок.

Для изучения фазового состава покрытия использовался микродюретрический метод [7]. Сущность его состоит в анализе спектра распределения микротвердости при многократном (в данном эксперименте – 500 раз) ее измерении, в результате чего на основании табличных данных для твердости отдельных фаз делается вывод об их процентном содержании в покрытии. Определение микротвердости производилось при помощи микротвердомера ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки, равной 0,981 Н (100 г).

Для исследованных покрытий характерен широкий разброс значений микротвердости. Значениям 11...13 ГПа соответствует микротвердость карбидов хрома различного стехиометрического состава [8]. Металлическая матрица включает в себя преимущественно фазы на основе α -железа с микротвердостью от 4 ГПа до 9 ГПа, окрашиваемые на травленных участках поверхности в серый цвет различной интенсивности: перлит, троостит, мартенсит, а также нетравящийся метастабильный остаточный аустенит с микротвердостью от 2 ГПа до 5,5 ГПа. В целом покрытия соответствуют структуре доэвтектических чугунов при более высокой степени неоднородности и дисперсности. Когда размер упрочняющей фазы меньше размера индентора микротвердомера, справедливо говорить о микротвердости не α - или γ - фазы, а участка покрытия с дисперсной композиционной структурой. Средняя микротвердость покрытий находится в пределах 7...8 ГПа.

Следует отметить, что достигнутые значения прочности сцепления не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к большинству деталей в промышленности, и требуют дополнительных технологических операций, повышающих прочность сцепления. Такими операциями могут быть отжиг, лазерное оплавление и ряд других.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, задание № Т05К – 023, а также Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины, проект № 10.02/019.

Заключение

1. Доказана возможность получения покрытий на основе чугунного порошка ИЧХ28Н2, полученного из отходов производства. Теоретически и экспериментально определен оптимальный диапазон режимов плазменного напыления указанных материалов: сила тока порядка 260 А, грануляция порошка 40..80 мкм, дистанция напыления 100..120 мм.
2. Определен фазовый состав формируемых покрытий. Структура формируемого покрытия имеет композиционное строение, матрица которого представляет α -железо, а твердые мелкодисперсные включения – карбиды хрома различного стехиометрического состава.
3. Установлено, что прочность сцепления нанесенного слоя с подложкой и пористость недостаточны для использования данного материала в чистом виде, что требует дальнейшей термической обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авсиевич А.М. Изучение особенностей процесса газотермического напыления покрытий из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на железной основе с применением математического моделирования / А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, С.П. Кундас, В.М. Константинов // Теория и практика машиностроения. – 2003. - № 2. – С. 23 – 26.
2. Авсиевич А.М., Влияние диффузионной боридной оболочки на процесс формирования и свойства плазменных напыленных покрытий из порошков на основе железа / А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, А.С. Володько, Л.И. Пилецкая // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: тематический сборник / Полоцкий гос. ун-т; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2003. – С. 41 – 44
3. Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления / Ю. С. Борисов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 42-51.
4. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. Ю.В. Цветков, С.А. Панфилов. – М.: Наука, 1980. – 359 с.
5. Девойно Ю.О. Исследование процесса лазерного оплавления газотермических покрытий на основе высокохромистого чугуна / Ю.О. Девойно // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы докладов 7-й международной научно-технической конференции, Минск, 16-17 мая 2006 г / Институт порошковой металлургии БГНПК ПМ; редкол.: А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск, 2006. - С. 263.

6. Перспективы применения дисперсных высокохромистых чугунов отходов для восстановления-упрочнения деталей / В. К. Ярошевич М.А. [и др.] // Машиностроение: респ. межведомственный сб. науч. тр. Вып. 21 / Белорус. нац. техн. ун-т, под ред. Б.М. Хрусталева: в 2 т.– Минск, 2005. – Т. 1 – С. 346-350.
7. Способ оценки фазового состава металлических и металлоподобных сплавов: а.с.1668903 СССР, МКИ G 01 N 3/00

- / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Г.Г. Панич: Бел. гос. политехн. ин-т. - № 4698464/28; заявл. 31.05.89; опубл. 07.08.91// Открытия Изобрет. – 1991. – № 29.
8. Композиционные покрытия на основе чугунов порошков / Ю.А. Харламов [и др.] // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. Трудов / Полот. гос. ун-т; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2001. – С. 72 – 76.

УДК 621.65.004

Голуб В.М., Добрияник Ю.А.

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ГИДРОМАШИН

ВВЕДЕНИЕ

Состояние рабочих поверхностей деталей узлов трения представляет собой один из главных показателей, определяющий эксплуатационные характеристики машин, так как отказы узлов трения, в основном, связаны с износом и нарушением геометрии трущихся деталей. Для гидромашин самыми уязвимыми узлами трения являются торцовые уплотнения валов и опоры скольжения.

От выбора материалов трущихся деталей и соответствующих технологий их обработки зависит надежность и долговечность узлов трения и гидромашин в целом.

Торцовые уплотнения валов и опоры скольжения работают в тяжелых условиях, в рабочих жидкостях, часто агрессивных и абразивных, со смазочной способностью, не отвечающей условиям нормальной эксплуатации. В процессе работы, при высоких скоростях скольжения контактные пары трения воспринимают как статические, так и динамические нагрузки с выделением тепловой энергии. Низкий отвод тепла с контактных поверхностей приводит к растрескиванию и разрушению деталей. Часто материалы с хорошими конструктивными свойствами не всегда удовлетворяют тем требованиям, которые предъявляются к их поверхностным характеристикам.

Последние достигаются применением различных технологических методов, позволяющих создать на поверхности контакта износостойкие теплоотводящие покрытия или слои, обладающие необходимым комплексом антифрикционных свойств [1].

Развитие технологических методов упрочнения поверхностей деталей машин связано с успехами фундаментальных научных исследований, которые привели к созданию технологий, обеспечивающих практически «эффект безызносности» [2, 3]. Новые технологии позволяют получить поверхностные слои с достаточной прочностью и твердостью, износной и коррозионной стойкостью, а также другими высокими эксплуатационными показателями.

Среди разнообразия технологических методов, направленных на достижение эффекта безызносности, следует выделить технологии «избирательного переноса», разработанные И.В. Крагельским, Д.Н. Гаркуновым и их научной школой [4].

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Одним из эффективных методов повышения надежности и долговечности торцовых уплотнений валов и осевых опор скольжения гидромашин является нанесение на рабочие поверхности контактных колец пар трения износостойкого слоя

из порошков карбида вольфрама со спеканием и пропиткой медьсодержащей матричной связкой, обладающего высокими теплопроводными и антифрикционными характеристиками [5].

Принципиальной особенностью изготовления таких колец является то, что соединяются различные по своим физико-механическим свойствам и химическому составу материалы. Контактное кольцо является комбинированной деталью, основу которой составляет конструкционная сталь, а нанесенный на рабочую поверхность износостойкий пояс толщиной 2-3 мм в заданных чертежом размерах представляет собой твердый композиционный материал с высокими антифрикционными характеристиками. Механическая обработка таких колец не представляет технологических трудностей, так как только контактная торцовая поверхность требует при обработке применения специального сверхтвердого абразивного инструмента. Технология изготовления колец пар трения с износостойким рабочим слоем включает следующие операции:

- выбор материала и получения заготовки контактных колец пары трения;
- приготовление шихты из порошков карбидов металлов; очистка заготовки и прессование шихты в торцовую канавку;
- приготовление матричного пропиточного сплава и его нанесение на напрессованный слой шихты;
- спекание и пропитка напрессованного слоя шихты в электропечи в восстановительной водородной или инертной среде;
- охлаждение заготовки вместе с печью;
- механическая обработка заготовки и получение контактного кольца пары трения торцового уплотнения или осевой опоры.

При приготовлении шихты порошки смешиваются. В смесь вводится пластификатор для уменьшения усилия прессования и получения прочного брикета. Нагрузка прессования принимается в пределах от 150 до 250 МПа.

Технологические приемы металлокерамического производства позволяют изготовить композиционные материалы, имеющие высокую степень взаимодействия и связи между частицами на межфазных границах переходов. Получение этих связей при спекании и пропитке обеспечивается тесным контактом зерен, их подплавлением и смачиванием расплавленным пропиточным материалом.

Среда спекания и пропитки является одним из важнейших факторов, влияющих на качество получаемого композиционного слоя, припекаемого к стальной основе контактного кольца. Водород восстанавливает окисные пленки, что ускоряет и улучшает спекание и пропитку. Вакуум содействует испарению окисных пленок и удалению адсорбированных газов и газов из

Голуб Владимир Михайлович, к.т.н., доцент, и.о. зав. каф. машиноведения Брестского государственного технического университета.

Добрияник Юрий Алексеевич, магистрант Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.