

УДК 621.762

О.О. КУЗНЕЧИК

Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси, г. Минск

И.П. СМЯГЛИКОВ, канд. техн. наук

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

А.В. СОСНОВСКИЙ, канд. техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ПЛАЗМЕННО-Порошковая НАПЛАВКА И ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ ПРОКАТКА АНТИФРИКЦИОННЫХ И ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

В статье приведена методика и результаты исследований процессов плазменной порошковой наплавки с последующей электроконтактной прокаткой антифрикционных и износостойких покрытий из БрОФ 10-1 и ПГ-СР4. Показано, что скорость плазменной порошковой наплавки влияет на коробление основы, а также на структуру (в частности, на остаточную пористость) материала антифрикционных и износостойких покрытий, включая их твердость и прочность. Проводимая после этого электроконтактная прокатка за счет сплющивания имеющихся пустот в материале порошкового покрытия, может снизить остаточную пористость, повысить твердость и прочность покрытий до уровня аналогичных, полученных при относительно малых (в два и более раз) скоростях наплавки.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, электроконтактная прокатка, антифрикционные покрытия, износостойкое покрытие

Введение. Плазменно-порошковая наплавка достаточно широко применяется для нанесения или восстановления антифрикционных и износостойких покрытий на рабочих поверхностях инструмента, деталей машин и узлов трения [1–3]. При этом в качестве исходных материалов покрытий, наносимых на стальную поверхность (основу), могут использоваться порошки бронзовых и самофлюсующихся сплавов. Преимущества этого метода заключаются в малой степени смешивания с материалом основы, незначительной зоне теплового воздействия и высокой скорости наплавки.

Несмотря на то, что плазменно-порошковая наплавка позволяет получать покрытия со структурой, близкой к литой, однако, при относительно высоких скоростях наплавки, повышается вероятность появления в этих покрытиях повышенной остаточной пористости. В то же время, за счет более мощных тепловых потоков, рассеиваемых в основе, может происходить ее коробление за счет действия термических напряжений. Вышеуказанные дефекты (коробление и повышенная пористость) являются характерными для соединений материалов, получаемых сваркой металлов, а также наплавленных покрытий [4, 5]. Эти дефекты ограничивают прочностные свойства антифрикционных и износостойких покрытий, полученных при относительно скоростной плазменно-порошковой наплавке. Снижения вероятности появления перечисленных дефектов является актуальной задачей для производства. Целью работы является изучения возможности решение этой задачи за счет электроконтактной прокатки полученных относительно скоростной плазменно-порошковой на-

плавкой антифрикционных и износостойких покрытий, а также оценка энергоэффективности проведения этой технологической операции.

Методика осуществления плазменно-порошковой наплавки и электроконтактной прокатки антифрикционных и износостойких покрытий. При проведении исследований для осуществления плазменной порошковой наплавки использовалось технологическое оборудование Физико-технического института НАН Беларуси. Структурная схема этого оборудования приведена на рисунке 1.

Плазменная порошковая наплавка осуществлялась согласно схеме, приведенной на рисунке 2.

В качестве исходных антифрикционных и износостойких материалов использовались порошки бронзовых БрОФ 10-1 (ГОСТ 613-79) и самофлюсующихся ПГ-СР 4 (ГОСТ 21448-75) сплавов с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Плазменно-порошковая наплавка производилась на поверхность заготовок экспериментальных образцов, изготовленных из низкоуглеродистой стали 20 (ГОСТ 1050-88). Заготовки экспериментальных образцов представляли собой прямоугольные пластины высотой — 4 мм, шириной — 25 мм и длиной — 105 мм. Плазменно-порошковая наплавка проводилась на двух скоростных режимах: относительно высоком (10–12 мм/с) и относительно низком (3–5 мм/с). С целью приведения к единым габаритным размерам, полученные плазменно-порошковой наплавкой экспериментальные образцы прошли механическую обработку. После этого часть экспериментальных образцов, полученных при относительно высоких скоростях наплавки, подверглась электроконтактной прокатке со-

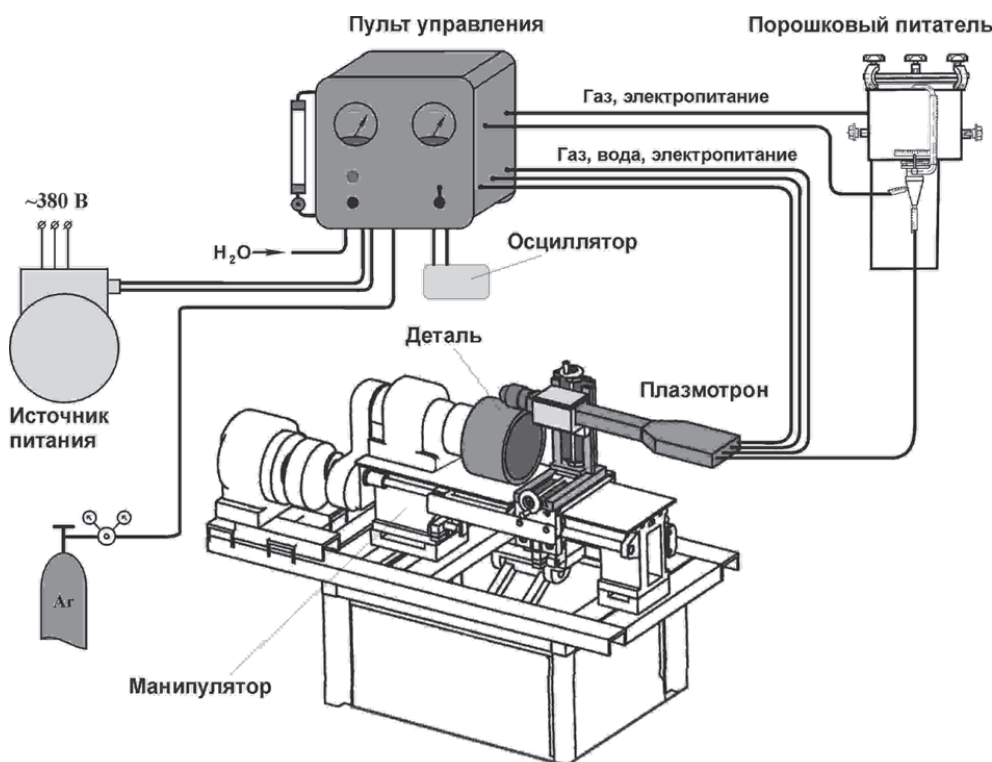


Рисунок 1 — Структурная схема технологического оборудования для порошковой плазменной наплавки

гласно приведенной схеме на рисунке 3. Электроконтактная прокатка проводилась в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси на машине шовной контактной сварки типа МШ-100.

Режимы плазменно-порошковой наплавки и электроконтактной прокатки приведены в таблицах 2 и 3.

При выполнении плазменно-порошковой наплавки и электроконтактной прокатки производился учет энергопотребления используемым технологическим оборудованием с помощью счетчиков электроэнергии типа ЦЭ 6803 и ЦЭ 6807.

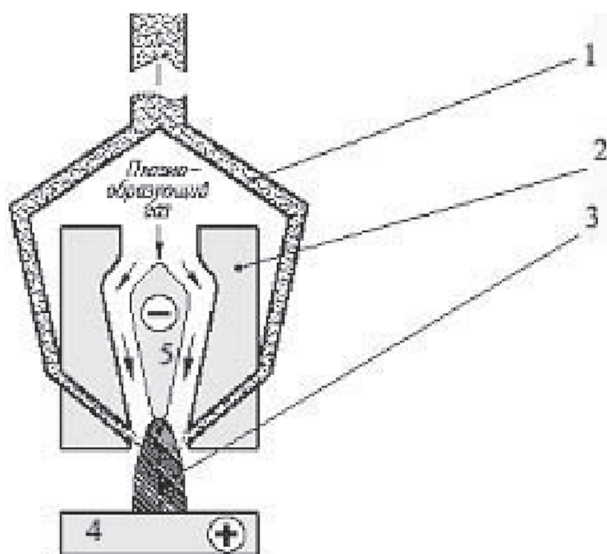


Рисунок 2 — Схема плазменно-порошковой наплавки:
1 — газопорошковая смесь; 2 — плазменнообразующее устройство; 3 — плазменная дуга; 4 — деталь; 5 — электрод

Полученные плазменно-порошковой наплавкой и электроконтактной прокаткой экспериментальные образцы подверглись в Институте порошковой металлургии механическим испытаниям и металлографическим исследованиям. При этом также выполнялся контроль внешним осмотром, который проводился с учетом требований СТБ 1133-99, ГОСТ 16504-81, ГОСТ 6996-66 и использования таких средств измерения, как штангенциркуль ШЦ-1-125-0,05 (ГОСТ 166-89), микрометр МК50-1 (ГОСТ 6507-90), измерительная лупа ЛИ-8 (ГОСТ 25706-83). При контроле внешним осмотром определялись не только линейные размеры и уровень коробления экспериментальных образцов, но также и значения коэффициентов обжатия (η), уширения (β) и вытяжки (λ), как для основы, так и покрытия (т. е. η_1 и η_2 , β_1 и β_2 , λ_{11} и λ_{21}). Расчеты этих коэффициентов производилась с помощью следующих зависимостей:

$$H_A = H_{A1} + H_{A2}, \quad H_B = H_{B1} + H_{B2}, \quad (1)$$

$$\eta_1 = \frac{H_{A2}}{H_{A1}}, \quad \eta_2 = \frac{H_{B2}}{H_{B1}}, \quad (2)$$

Таблица 1 — Характеристики исходных порошков

Порошок	Фракция, мм	Пикнометрическая плотность, кг/м ³	Фактор формы, FF
БрОФ 10-1	(-0,1 ... +0,08)	4700	0,96
ПГ-СР4	(-0,04)	4200	0,97

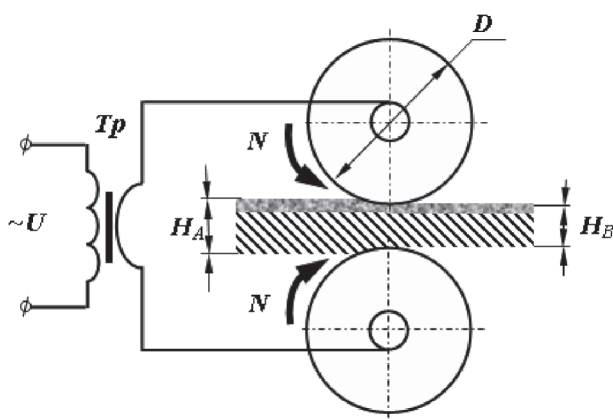


Рисунок 3 — Схема электроконтактной прокатки:
 $\sim U$ — напряжение переменного тока, В; T_p — сварочный трансформатор; D — диаметр волок-электродов;
 N — скорость вращения, об/мин; H_A , H_B — начальная и конечная высота экспериментальных образцов

Таблица 2 — Режимы плазменно-порошковой наплавки покрытий из БрОФ 10-1 и ПГ-СР4

Параметры	Ед. изм.	Значения
Расход порошка	кг/ч	0,8–1,2
Плазмообразующий газ	—	Аргон
Расход плазмообразующего газа	л/мин	6–10
Электрический ток короткой дуги	А	60–80 и 90–110
Линейная скорость перемещения заготовки	мм/с	3–5 и 10–12
Толщина наплавляемого слоя	мм	~1

Таблица 3 — Режимы электроконтактной прокатки покрытий из БрОФ 10-1 и ПГ-СР4

Показатели	Ед. изм.	Значения
Напряжение переменного тока на первичной обмотке трансформатора	В	380
Частота переменного тока	Гц	50
коэффициент трансформации		65
Усилие сжатия волок-электродов	даН	250 и 500
Фазовое регулирование мощности нагрева	%	40–50 и 60–70
Диаметр электродов-волоков	мм	200
Угловая скорость	об/мин	0,5 и 1,0
Угол захвата	град.	10 и 15

$$\beta_1 = \frac{B_{B1}}{B_{A1}}, \quad \beta_2 = \frac{B_{B2}}{B_{A2}}, \quad (3)$$

$$\lambda_{11} = \frac{L_{A2}}{L_{A1}}, \quad \lambda_{21} = \frac{L_{B2}}{L_{B1}}, \quad (4)$$

$$\lambda_{12} = \frac{1}{\eta_1 \beta_1}, \quad \lambda_{22} = \frac{1}{\eta_2 \beta_2}, \quad (5)$$

где H_{A1} и H_{A2} , H_{B1} и H_{B2} — начальная и конечная высота основы и покрытия; B_{A1} и B_{A2} , B_{B1} и B_{B2} — начальная и конечная ширина основы и покрытия; L_{A1} и L_{A2} , L_{B1} и L_{B2} — начальная и конечная длина основы и покрытия; λ_{12} , λ_{22} — коэффициенты вытяжки, получаемые, исходя из постоянства объемов.

На втором этапе в ходе проведения механических испытаний использовался твердомер типа ТДМ-1 и разрывная машина типа Р-0,5, с помощью которой, согласно схеме, приведенной на рисунке 4, определялась прочность покрытий.

Проводимые на этом этапе металлографические исследования осуществлялись с использованием оптического микроскопа типа МИ-1, а также количественного стереологического анализа, проводимого на программном комплексе визуализации и обработки изображений «Autoscan» НИИ Прикладных физических проблем при БГУ (г. Минск), позволяющим оценивать остаточную пористость в материале покрытия.

Результаты исследований и их анализ. Проведенные с учетом вышеизложенной методики исследования процессов плазменно-порошковой наплавки и электроконтактной прокатки позволили получить следующие результаты.

Перед плазменно-порошковой наплавкой стальные заготовки экспериментальных образцов имели прямолинейный профиль. После нанесения на них антифрикционных (БрОФ 10-1) и износостойких (ПГ-СР4) покрытий профиль экспериментальных образцов представлял дугообразную линию за счет изгиба концов. На экспериментальных образцах, полученных при относительно малых скоростях плазменно-порошковой наплавки, этот изгиб составил 0,9–1,2 мм. Изгиб экспери-

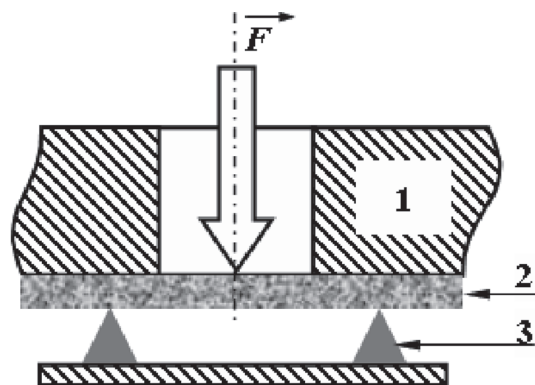


Рисунок 4 — Схема определения прочности покрытия:
 F — усилие нагружения

ментальных образцов, полученных при относительно высоких скоростях, составил 1,1–1,4 мм. При этом было зафиксировано снижения энергопотребления на 20–25 %.

Механическая обработка экспериментальных образцов, состоящих из стальной основы и порошкового покрытия (в дальнейшем — состоящих из основы и покрытий), привела к единству их габаритных размеров, которые имели следующие значения: высота — $5 \pm 0,01$ мм, ширина — $20 \pm 0,01$ мм, длина — $100 \pm 0,02$ мм. При этом значения высот основы и покрытия имели разброс 3,8–4,0 мм и 1,0–1,2 мм соответственно. Однако механическая обработка не изменила профиль экспериментальных образцов, изгиб их концов остался прежним.

Электроконтактная прокатка на установленных режимах привела к определенному выравниванию профиля экспериментальных образцов (максимальное отклонение от прямолинейности за счет загиба концов в этом случае составило 0,3–0,5 мм) и вызвало некоторое изменение линейных размеров основы и покрытия. При этом полученные с учетом зависимостей (1)–(4) по результатам соответствующих измерений высоты, ширины и длины коэффициенты обжатия (η), уширения (β) и вытяжки (λ_L), а также вытяжки (λ_V), полученной с учетом предполагаемого постоянства объемов и зависимости (5), представлены в таблице 4.

При сравнении энергозатрат на получение одного экспериментального образца путем относительно низкой скорости плазменно-порошковой наплавки, а также при относительно высокой скорости с последующей электроконтактной прокаткой, зафиксировано снижение энергопотребления во втором случае на 12–15 %.

Результаты проведенных металлографических исследований и механических испытаний покрытий этих экспериментальных образцов представлены в таблицах 5–7 и на рисунке 5.

Таблица 4 — Значения коэффициентов обжатия, уширения и вытяжки основы и покрытия

Коэффициенты	η	β	λ_L	λ_V
Основа	0,99	1,005	1,005	1,00508
Покрытие БрОФ 10-1	0,94	1,009	1,009	1,05539
Покрытие ПГ–СР4	0,96	1,006	1,006	1,0356

Таблица 5 — Характеристики покрытий после наплавки со скоростью 3–5 мм/с

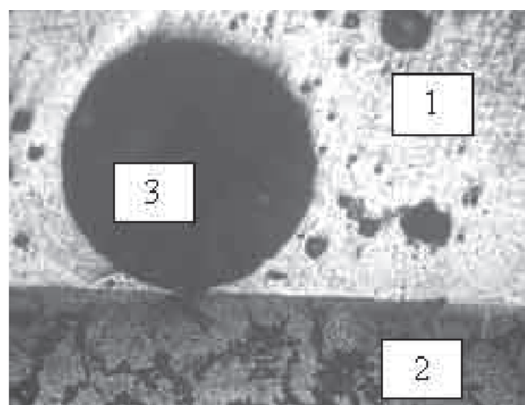
Материал покрытия	Пористость, %	Прочность, МПа	Твердость, НВ
БрОФ 10-1	4–6	158–163	82–89
ПГ–СР4	5–7	176–181	58–60

Таблица 6 — Характеристики покрытий из БрОФ 10-1 после наплавки и обкатки

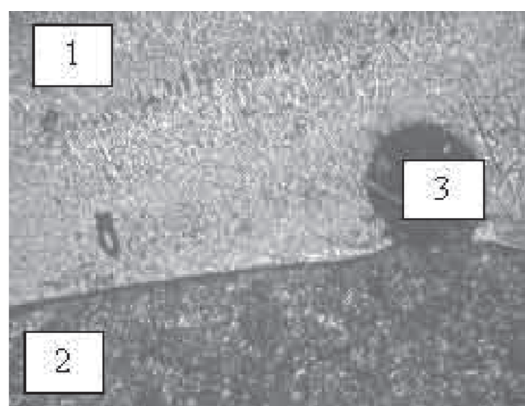
Покрытия	Пористость, %	Прочность, МПа	Твердость, НВ
После наплавки со скоростью 10–12 мм/с	9–11	121–130	74–78
После наплавки со скоростью 10–12 мм/с и электроконтактной прокатки	4–6	136–145	82–89

Таблица 7 — Характеристики покрытий из ПГ–СР4 после наплавки и обкатки

Покрытия	Пористость, %	Прочность, МПа	Твердость, НРС
После наплавки со скоростью 10–12 мм/с	12–14	158–163	53–55
После наплавки со скоростью 10–12 мм/с и электроконтактной прокатки	6–8	178–182	59–61



а



б

Рисунок 5 — Выявленные поры в материале покрытий: а — после плазменно-порошковой наплавки при скорости 10 мм/с; б — после электроконтактной прокатки (1 — покрытие; 2 — основа; 3 — пора)

Заключение. Анализ результатов механических испытаний и металлографических исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Скорость плазменно-порошковой наплавки влияет на коробление основы, а также на структуру (в частности, на остаточную пористость) материала антифрикционных и износостойких покрытий, включая их твердость и прочность. Относительно высокие скорости наплавки, могут приводить к повышению остаточной пористости, снижению прочности и твердости наплавляемых покрытий, а также к увеличению коробления основы. Последнее может объясняться возрастанием термических напряжений из-за увеличения градиента перепада температур в материале основы, вследствие ее относительно малой длительности нагрева. Однако более высокие скорости плазменной порошковой наплавки, могут также снизить энергопотребление этого процесса на 20–25 %. Это может быть связано с уменьшением продолжительности теплообмена с окружающей средой.

2. Электроконтактная прокатка антифрикционных и износостойких покрытий, полученных при относительно высоких скоростях плазменно-порошковой наплавки, за счет пластических деформаций, приводящих к сплющиванию имеющихся пустот, может снижать остаточную пористость, повышать твердость, прочность покрытий до уровня аналогичных, полученных при относительно малых (в два и более раз) скоростях наплавки. При этом электроконтактная прокатка также может обеспечить уменьшение уровня коробления основы покрытия в полтора-два раза и способствовать снижению на 10–12 % затрат энергопотребления используемого для получения антифрикционных и износостойких порошковых покрытий технологического оборудования.

3. Снижение остаточной пористости в материале порошкового покрытия при электроконтактной прокатке приводит к нарушению закона постоянства объемов в том виде, в котором он применяется при оценке результатов прокатки материалов, обладающих абсолютной сплошностью. Нарушение этого закона, устанавливающего линейную зависимость между коэффициентами обжатия, уширения и вытяжки, может стать очевидным, если перед электроконтактной прокаткой порошковые покрытия имели остаточную пористость, превышающую 5 %. По отклонению экспериментальных значений коэффициентов обжатия, уширения и вытяжки от расчетных значений, которые были бы получены при наличии абсолютной сплошности, можно проводить оценку остаточной пористости материала порошкового покрытия после электроконтактной прокатки.

Список литературы

1. Плазменно-порошковое припекание антифрикционных и износостойких покрытий из порошков бронзы и самофлюсующихся сплавов / И.П. Смягликов [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы и защитные покрытия, сварка: матер. докл. 8-ой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 27–28 мая 2008 г. — Минск: ИПМ ГНПО ПМ, 2008. — С. 226–227.
2. Смягликов, И.П. Технология порошковой плазменной наплавки антифрикционных и износостойких покрытий / И.П. Смягликов, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик // Сварка и родственные технологии: материалы докл. Междунар. симпозиума, Минск, 24 марта 2010 г. — Минск: Ковчег, 2010. — С. 95–97.
3. Ивашко, В.С. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. / В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов. — Минск: Навука і тэхніка, 1996. — 375 с.
4. Хасуй, А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моригаки. — М.: Машиностроение, 1985. — 154 с.
5. Сварка и свариваемые материалы: Технология и оборудование / под ред. В.М. Ямпольского. — М.: МГТУ, 1996. — 574 с.

Kuznechik O.O., Smjaglikov I.P., Sosnovsky A.V.

Plasma-jet powder hard-facing and electric resistance rolling of antifrictional and wear-resistant coatings

In article the technique and results of researches of processes plasma-jet powder hard-facing with the subsequent electric resistance rolling of antifrictional and wearproof coatings made from nickel and bronze powders is resulted. It is shown, that speed of plasma-jet powder hard-facing influences on bases distortion, and also structure (in particular, on residual porosity) of antifrictional and wear-resistant coatings material, including their hardness and strength. The electric resistance rolling realized after overlaying welding, at the expense of flattening of available hollows in the material of a powdered coating, can reduce the residual porosity, raise hardness and strength of coatings to level analogous, gained at rather small (in two and more times) speeds of plasma-jet powder hard-facing.

Keywords: *plasma-jet powder, electric resistance rolling, antifrictional coatings, wear-resistant coatings*

Поступила в редакцию 28.01.2013.