

10. Девойно О. Г. Исследование процесса формирования поверхности методом селективного лазерного спекания из сплава ПГ-СРЗ / Современные методы и технологии создания и обработки материалов / Сб. научных трудов / 2016 С. –404 – 414.

УДК 621.791.72

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВАЛИКОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СЛОЕВ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье рассматриваются возможности лазерной наплавки при формировании мультимодальных полосчатых слоев из разнородных материалов. Показано влияние технологических режимов лазерной наплавки на геометрические размеры наплавочных валиков. Методом полного факторного эксперимента получены зависимости высоты и ширины валиков наплавки от скорости и дистанции наплавки.

Лазерная наплавка имеет целый ряд преимуществ перед другими технологиями нанесения покрытий. Прежде всего, это связано с небольшими размерами наплавляемых валиков, сравнимыми с диаметром лазерного пятна на поверхности наплавки и локальностью нагрева. Благодаря своим особенностям метод лазерной наплавки позволяет проектировать и создавать мультимодальные покрытия, состоящие из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Уникальность метода лазерной наплавки при создании мультимодальных покрытий состоит в том, что покрытия с полосчатой архитектурой могут создаваться из металлургических материалов, что практически трудно осуществить другими способами. Реализация технологии нанесения мультимодальных покрытий методом лазерной наплавки неразрывно связана с использованием системы числового программного управления для осуществления процесса наплавки, что позволяет с высокой точностью создавать архитектуру мультимодальных поверхностных слоев. Технология создания мультимодальных покрытий может быть использована как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления их изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [1,2].

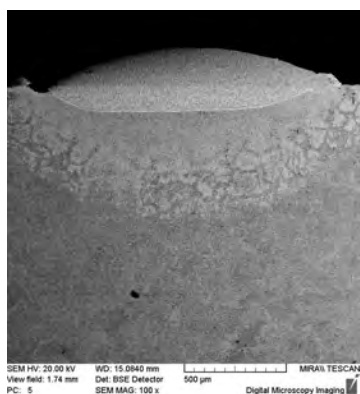


Рис. 1. Поперечный шлиф валика, полученного лазерной наплавкой сплава ПГ-12Н-01 при скорости наплавки $V=40$ мм/мин и дистанции наплавки $L=10$ мм

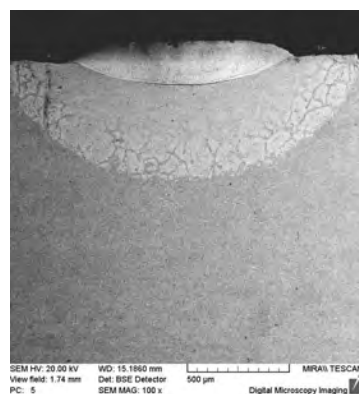


Рис. 2. Поперечный шлиф валика, полученного лазерной наплавкой сплава ПГ-12Н-01 при скорости наплавки $V=60$ мм/мин и дистанции наплавки $L=12$ мм

Прежде чем приступить к созданию мультимодальных покрытий из разнородных металлических материалов должна быть отработана технология лазерной наплавки валиков из со-

ставляющих мультимодального покрытия. В частности, должны быть выявлены закономерности формирования геометрических размеров валиков в зависимости от режимов лазерной наплавки, так как поперечные размеры валиков, получаемых при различных режимах наплавки, достаточно сильно отличаются. На рисунках 1 и 2 показаны поперечные шлифы валиков, полученных при различных скоростях и дистанциях наплавки. При этом хорошо видно, что высота и ширина валиков отличаются в 1, 4-1,5 раза. В этой работе исследованы основные особенности формирования геометрии поперечного сечения валиков, получаемых при лазерной наплавке при изменении таких параметров, как дистанция наплавки и скорость наплавки.

Для выполнения исследований применялся лазерный технологический комплекс на базе газового СО₂ лазера непрерывного действия «Комета 2» с мощностью излучения до 1000Вт и 3-х координатной системы с числовым программным управлением для обеспечения необходимой точности перемещения наплавочной головки относительно наплавляемых образцов. Лазерная наплавка производилась при мощности излучения 1000 Вт, величине подачи порошка 12 г/мин на образцы из стали 45 имевшие размеры 20x30x8 мм. В качестве наплавочного материала использовались порошки самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, имевшие грануляцию 20-80 мкм. Высота валиков над поверхностью наплавки и ширина валиков определялись на поперечных шлифах зон наплавки при помощи металлографического микроскопа с видеофиксацией «Микро Р200».

В результате предварительных оценочных экспериментов было установлено, что зависимости высоты и ширины валиков наплавки от скорости и дистанции наплавки имеют линейный характер. Поэтому для сокращения количества выполняемых экспериментов и получения наиболее достоверных данных использовалась методика полного факторного эксперимента (ПФЭ). Обработка данных экспериментов производилась при помощи специальной программы, составленной на основе редактора электронных таблиц Microsoft Excel 2010.

Были поставлены эксперименты по плану ПФЭ 2², каждый эксперимент повторялся два раза. В качестве факторов влияющих на высоту валиков над поверхностью наплавки $y(H)$ (мм) для сплава ПГ-12Н-01 были выбраны:

z_1 – скорость наплавки v (мм/мин), $z_{1min}= 40$, $z_{1max}=120$;

z_2 – дистанция наплавки l (мм), $z_{2min}= 10$, $z_{2max}= 14$.

Исходная матрица планирования для высоты валиков над поверхностью наплавки для сплава ПГ-12Н-01 имела вид (таблица 1).

Таблица 1 – Исходная матрица планирования для высоты валиков

№ эксперимента	Исследуемые факторы		Результаты опытов		
	z_1	z_2	y_1	y_2	\bar{y}
1	-1	-1	0,15	0,23	0,19
2	+1	-1	-0,01	0,01	0
3	-1	+1	0,28	0,34	0,31
4	+1	+1	0,08	0,12	0,1

Для каждого фактора находился центр плана, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной x от натуральной z (таблица 2).

Таблица 2 – Кодирование факторов

Факторы	Верхний уровень	Нижний уровень	Центр плана $z_0 = \frac{z_{max} + z_{min}}{2}$	Интервал варьирования $\lambda = \frac{z_{max} - z_{min}}{2}$	Зависимость кодированной переменной от натуральной
z_1	120	40	80	40	$x_1 = \frac{z_1 - 80}{40} = 0,0$
z_2	14	10	12	2	$x_2 = \frac{z_2 - 12}{2} = 0,5$

Программа выполняла проверку воспроизводимости эксперимента по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена составляло $G_{расч}=0,533$, табличное значение $G_{кр}=0,9065$. Так как $G_{расч}<G_{кр}$, это означает, что проверка однородности дисперсии выполняется, эксперимент воспроизводим.

Также при помощи программы были определены коэффициенты регрессии $b_0 = 0,15$, $b_1 = -0,1$, $b_2 = 0,055$, приведенные коэффициенты регрессии для проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента $t_0 = 10,954$, $t_1 = 7,303$, $t_2 = 4,017$ и табличное значение критерия Стьюдента $t_{кр} = 2,776$. Так как все приведенные коэффициенты регрессии больше $t_{кр}$, то все коэффициенты регрессии значимы.

Программа также производила проверку адекватности уравнения регрессии по критерию Фишера. Было определено расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}=0,133$ и табличное значение $F_{кр} = 7,71$. Так как $F_{расч}<F_{кр}$, то уравнение регрессии считается адекватным.

Таким образом, полученное уравнение регрессии для высоты валиков над поверхностью наплавки в кодированных переменных для сплава ПГ-12Н-01 имело вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 = 0,15 - 0,1x_1 + 0,055x_2.$$

После учета зависимостей, приведенных в таблице 2 уравнение регрессии в натуральных переменных для высоты валиков над поверхностью наплавки для сплава ПГ-12Н-01 приняло вид

$$y = H = 0,02 - 0,0025v + 0,0275l. \quad (1)$$

В качестве факторов, влияющих на ширину валиков $y(I)$ (мм) для сплава ПГ-12Н-01 были выбраны те же факторы, что и для высоты валиков над поверхностью наплавки. В результате обработки данных было получено уравнение регрессии в натуральных переменных для ширины валиков из сплава ПГ-12Н-01.

$$l = 2,133 - 0,0018v - 0,076l. \quad (2)$$

В качестве факторов влияющих на высоту валиков над поверхностью наплавки $y(H)$ (мм) и ширину валиков $y(I)$ (мм) для бронзы ПГ-19М-01 были выбраны:

z_1 – скорость наплавки v (мм/мин), $z_{1min} = 100$, $z_{1max} = 300$;

z_2 – дистанция наплавки l (мм), $z_{2min} = 10$, $z_{2max} = 14$.

В результате обработки данных, аналогичной описанной выше, были получены уравнения регрессии в натуральных переменных для бронзы ПГ-19М-01:

- для высоты валиков над поверхностью наплавки

$$H = -0,02 - 0,00065v + 0,0275l; \quad (3)$$

- для ширины валиков

$$l = 3,044 - 0,00077v - 0,0965l. \quad (4)$$

На основании уравнений 1, 2, 3, 4 были построены зависимости высоты валиков над поверхностью наплавки H и ширины валиков для сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки и дистанции наплавки (рисунки 3-10).

На рисунках 3 и 7 показаны зависимости ширины валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки. Из них видно, что при увеличении скорости наплавки ширина валиков уменьшается. Такая зависимость объясняется тем, что при увеличении скорости наплавки один и тот же объем подаваемого в зону наплавки материала распределяется на большей длине наплавки. Естественно, что при этом ширина валика должна уменьшаться.

На рисунках 4 и 8 показаны зависимости ширины валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 от дистанции наплавки. Видно, что при увеличении дистанции наплавки ширина валиков уменьшается. Это объясняется тем, что увеличение дистанции наплавки приводит к уменьшению пятна нагрева и, как следствие, к уменьшению ширины валика.

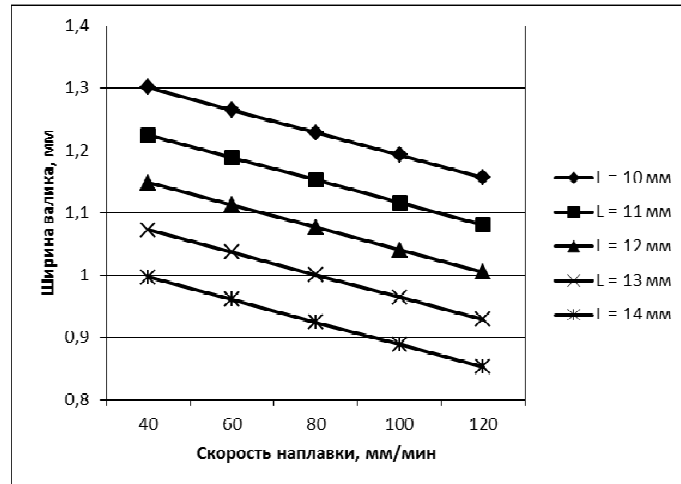


Рис. 3. Зависимость ширины валика от скорости наплавки для сплава ПГ-12Н-01

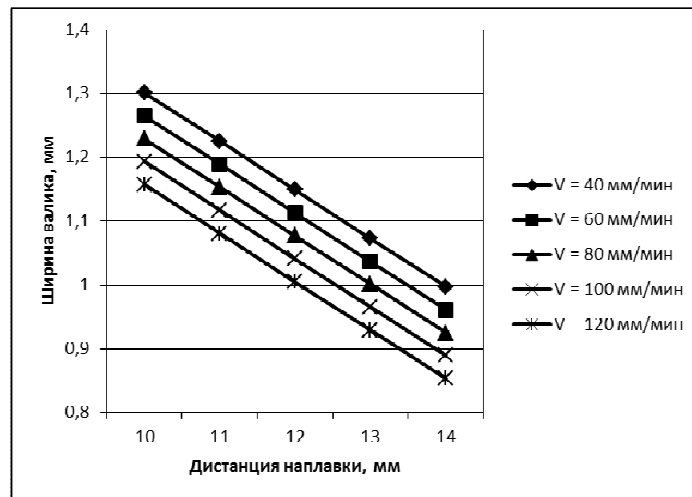


Рис. 4. Зависимость ширины валика от дистанции наплавки для сплава ПГ-12Н-01

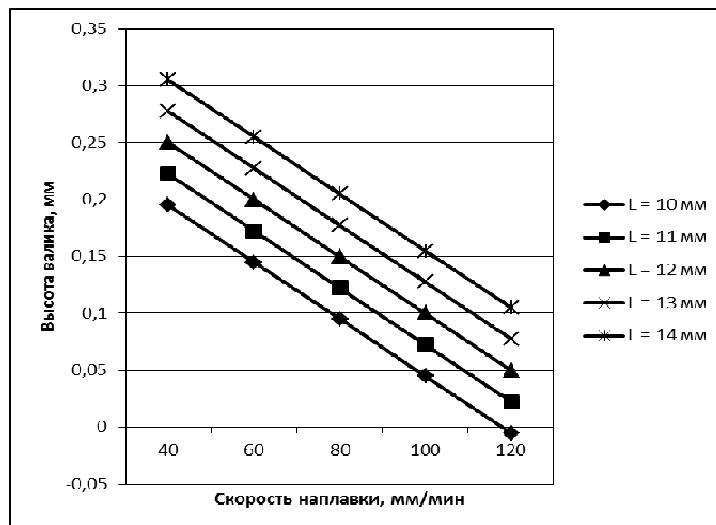


Рис. 5. Зависимость высоты валика от скорости наплавки для сплава ПГ-12Н-01

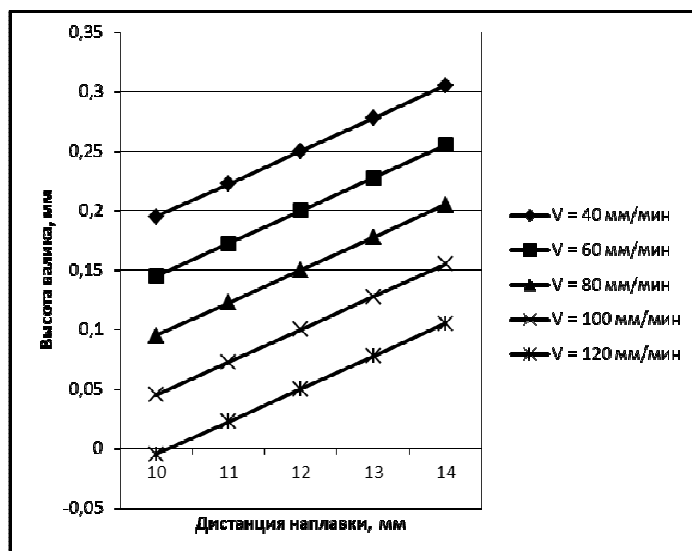


Рис. 6. Зависимость высоты валика от дистанции наплавки для сплава ПГ-12Н-01

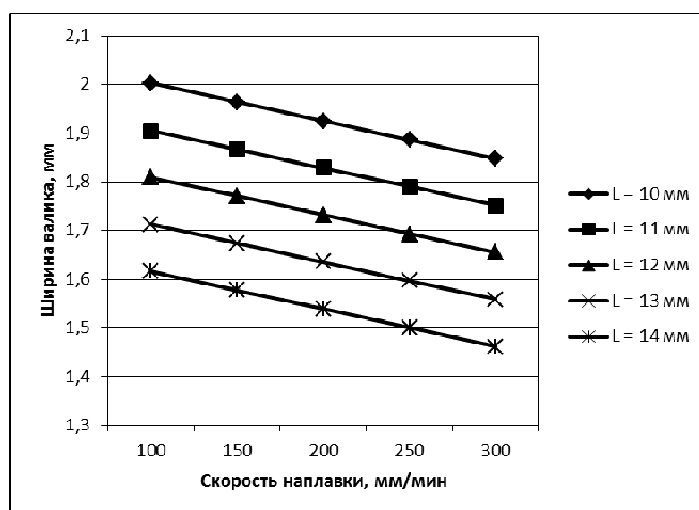


Рис. 7. Зависимость ширины валика от скорости наплавки для бронзы ПГ-19М-01

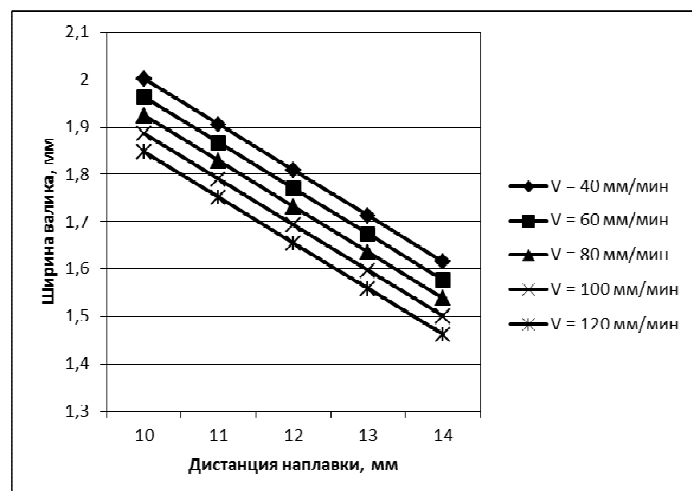


Рис. 8. Зависимость ширины валика от дистанции наплавки для бронзы ПГ-19М-01

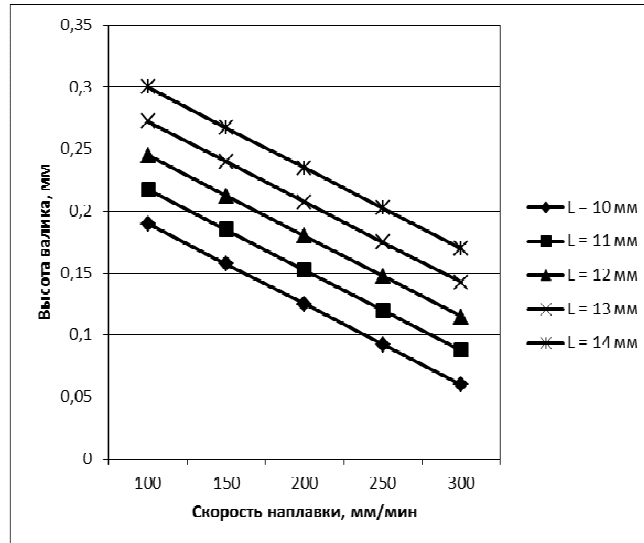


Рис. 9. Зависимость высоты валика от скорости наплавки для бронзы ПГ-19М-01

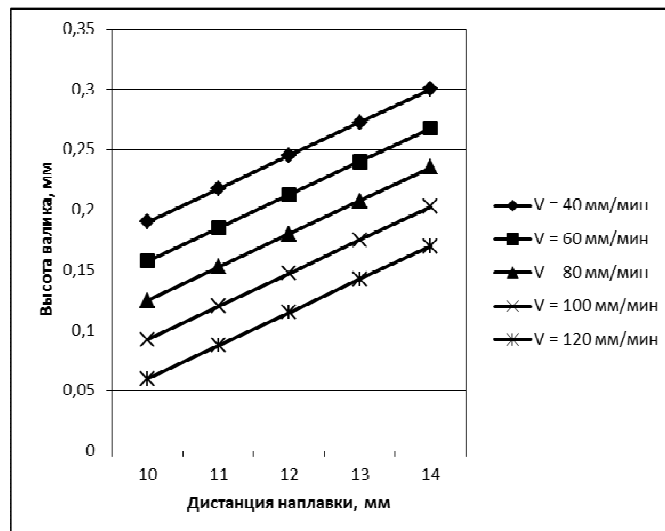


Рис. 10. Зависимость высоты валика от дистанции наплавки для бронзы ПГ-19М-01

Зависимости высоты валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки приведены на рисунках 5 и 9. При увеличении скорости наплавки высота валиков заметно уменьшается. Так же как для ширины валиков такую зависимость можно объяснить тем, что с увеличением скорости наплавки один и тот же объем наносимого материала распределяется на большей длине валика.

Несколько другой вид имеют зависимости высоты валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 от дистанции наплавки. Из рисунков 6 и 10 видно, что при увеличении дистанции наплавки высота валиков также увеличивается. Это связано с тем, что с увеличением дистанции наплавки пятно нагрева уменьшается, но за счет поступления одного и того же количества порошка высота валиков увеличивается.

Таким образом, проведенные исследования показали, что режимы лазерной наплавки оказывают существенное влияние на размеры поперечного сечения наплавленных валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Полученные зависимости позволяют производить выбор скорости и дистанции наплавки для получения требуемых величин высоты и ширины валиков. Результаты исследований весьма важны для проектирования и нанесения мультимодаль-

ных композиционных покрытий, так как дают возможность с высокой точностью получить необходимую архитектуру мультимодальных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок/ Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.
2. Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий/ И.В. Шишковский– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, - 424 с.

УДК 621.762:621.793

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Показана возможность повышения прочности сцепления керамических покрытий на основе оксида алюминия путем модификации порошковых материалов для напыления методом термодиффузионной обработки. Предлагаемая технология позволяет одновременно решать как проблемы с повышением прочности сцепления, так и обеспечить управляемость свойствами формируемых покрытий

Введение. Уровень основных эксплуатационных свойств плазменных керамических покрытий, таких, как износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость и другие, определяется технологией их нанесения и свойствами используемых для напыления порошковых материалов. При этом важнейшей характеристикой керамических покрытий остается прочность сцепления, поскольку при работе деталей с износостойкими покрытиями в условиях ударных или растягивающих нагрузок потеря работоспособности происходит не в результате постепенного абразивного износа поверхности, а в результате появления трещин на поверхности и отслаивания покрытия от основы вследствие значительного отличия в свойствах и наличия высоких остаточных напряжений.

Анализ существующих методов повышения прочности сцепления керамических покрытий [1] показал, что решение этой проблемы достигается как за счет подготовки поверхности, создания промежуточных переходных слоев и воздействия на уже сформированные покрытия, так и модификации самих напыляемых порошков. Среди указанных методов последний с нашей точки зрения имеет наибольшие перспективы, поскольку позволяет одновременно решать как проблемы с повышением прочности сцепления, так и обеспечить управляемость свойствами формируемых покрытий.

Применение керметных плазменных покрытий на основе оксида алюминия с металлической связкой [2] взамен металлических промежуточных слоев позволяет повысить прочность сцепления покрытий и упростить технологию их нанесения. Напыление металлокерамических смесей различных композиций приводит к увеличению пластичности, коэффициента термического расширения и выравниванию градиентов остаточных напряжений по сечению покрытий. Основные трудности при напылении керметов связаны с обеспечением однородности и равномерности транспортировки материала в горелку. Применение механических смесей металлических и керамических частиц затруднено их сепарацией при прохождении через плазменную струю, а также ухудшением качества получаемых покрытий вследствие различных скоростей полета частиц в потоке. Раздельное транспортирование металлов и керамики в плазменной горелке решает эти трудности, но усложняет механизм подачи.

Ранее проведенные в БНТУ исследования, показали перспективность метода термодиффузионной обработки порошков, предназначенных для напыления покрытий [3]. Указанная технология эффективно апробирована для металлических порошков на основе железа, никеля,