

УДК 621.762

РАЦИОНАЛЬНОЕ АКТИВИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛИМЕРОВ

д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

*Предложен подход к выбору технологических приемов активирования, базирующийся на соот-
ветствии добавляемых материальных затрат стоимости упрочняемой или восстанавливаемой детали.
Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность существенной интенсифика-
ции динамических параметров двухфазной струи и процессов теплообмена в системе «факел – частицы»
за счет активирования спутными потоками, что позволило разработать оборудование и процессы
нанесения покрытий с требуемыми свойствами напылением порошками материалов с теплопроводно-
стью 2...5 Вт/м·град, смесями порошков металлов и керамики, порошков термопластичных полимеров с
температурой плавления от 360 до 550 К, полимерными шнурами, металлическими проволоками.*

Введение. Среди интенсивно развивающихся ресурсосберегающих методов газотермического напы-
ления покрытий различного функционального назначения технологии газопламенного напыления (ГПН)
порошковых и проволочных материалов отличаются простотой, экономичностью и относительно низкой
удельной стоимостью, причем их мировой годовой объем рынка в 2012 году составил более 640 млн. евро.
Особенно эффективен метод ГПН при восстановлении деталей машин и механизмов общемашинострои-
тельного профиля, т.е. там, где не требуется наносить слои из керамики, жаропрочных композитов, а ре-
ставрации подлежат детали из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов.

В последние годы важнейшей задачей в области исследования процессов и явлений, протекающих
при напылении, явилось изыскание новых приемов (или их совокупности) активации, позволивших со-
вершить качественный скачок в свойствах покрытий и диапазоне наносимых материалов. Однако обес-
печиваемый применением активированного напыления эффект не всегда адекватен тем затратам, за счет
которых он достигнут. Так, для увеличения адгезии порошковых покрытий с 25 до 50 МПа в США и стра-
нах Западной Европы используют высокоскоростные системы, вызывающие пяти-, восьмикратное уве-
личение удельной себестоимости процесса. С учетом амортизационных расходов удельная стоимость,
например, HVOF- (High Velocity Oxygen Fuel) и HVOF-процессов (High Velocity Air Fuel) возрастает еще
в полтора раза. Исходя из этого следует, что многие изделия нецелесообразно восстанавливать или
упрочнять с использованием технологий высокоскоростного напыления, удельная себестоимость которых
составляет (без стоимости порошковых материалов) более 40 \$/кг. Определено [1], что для восстановле-
ния-упрочнения более половины быстроизнашивающихся деталей транспортных средств и различного
технологического оборудования необходимо разрабатывать и использовать технологии, себестоимость ко-
торых, включая последующую обработку или модифицирование, составляет не более 6,5 у. е. на 1 кг
наносимого материала без его стоимости.

Уровень экономики и технического развития промышленного производства Беларуси и стран СНГ
накладывает достаточно жесткие ограничения на возможности использования дорогостоящих матери-
алов для покрытий, реализации разрабатываемых приемов активации процесса ГПН и последующего
упрочнения. Целесообразность их использования должна прежде всего отвечать требованиям отече-
ственных предприятий, а затраты на освоение соответствовать решаемым проблемам. Значит, речь
может идти только о разработке рациональных методов активирования и соответствующих техниче-
ских средств, реализующих эти методы. Для дальнейшего развития процесса газопламенного напыле-
ния возникла необходимость в создании методологии прогнозирования оптимальных величин физико-
механических характеристик покрытий, отвечающих конкретным условиям эксплуатации, а также в
разработке приемов рационального активирования процесса ГПН и модифицирования покрытий, поз-
воляющих обеспечить эти величины.

Основная часть. Твердость, пористость и прочность сцепления покрытия с основой определяют-
ся скоростью, температурой и фазовым состоянием частиц напыляемого материала в момент их столкно-
вения с обрабатываемой поверхностью. Как показал проведенный анализ [2], использование при газо-
термическом напылении спутных потоков, истекающих в двухфазную струю, позволяет существенно
повысить скорость частиц при их контакте с основой.

Количественная оценка влияния спутного потока на параметры двухфазной струи была получена
еще в 70-х годах прошлого века с помощью интегральных методов Г.Н. Абрамовичем с сотрудниками [3].

Интегральные методы, однако, имеют существенный недостаток – для их реализации необходим большой объем экспериментальной информации, подтверждающей допущение о подобии всех параметров в поперечных сечениях, о границах начального и основного участков и т.д., что значительно ограничивает область применения данных методов. Развитие вычислительной техники дало возможность при математическом моделировании неравновесных двухфазных течений использовать систему дифференциальных уравнений в частных производных. Предполагается, что метод компьютерного моделирования взаимодействия спутных потоков с двухфазными струями позволит рассчитать скорость частиц, приобретаемую в результате активации спутными потоками.

Для описания случая с независимым источником спутного потока была предложена «трехслойная» физическая модель [4] (в случае «двухслойной» модели спутный поток возникает при движении источника, генерирующего факел), описывающая движение двухфазной струи в искусственно созданном спутном потоке, который истекает в затопленное пространство. Начальные условия согласно этой модели имеют вид:

$$0 \leq r_i \leq R_{a1}; \quad V_i = V_{\phi}; \quad R_{a1} < r_i < R_{a2};$$

$$V_i = V_{\text{сп}}; \quad R_{a2} < r_i < \infty; \quad V_i = 0.$$

В математической модели, описывающей течение стационарной осесимметричной двухфазной изобарической струи, использована система дифференциальных уравнений и условие «двухжидкостной сплошной среды», согласно которому реальное течение смеси частиц и газа заменяется взаимопроникающим течением двух сплошных сред – собственно газа и «газа частиц».

Исследуемые стационарные дозвуковые изобарические струи имеют вытянутую форму, поэтому отношение поперечной компоненты скорости к продольной и отношение продольного градиента к поперечному меньше единицы, что позволяет вместо уравнений Навье – Стокса воспользоваться приближением пограничного слоя. При определенных допущениях ламинарное течение стационарной осесимметричной двухфазной изобарической струи в приближении пограничного слоя в цилиндрической системе координат с продольной координатой x и поперечной r описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u r) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) = 0, \quad (1)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \sum_k \rho_k \left(u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \mu}{\text{Pr}} \frac{\partial H}{\partial r} + r \mu (1 - \text{Pr}^{-1}) \frac{\partial}{\partial r} \frac{u^2 + v^2}{2} \right] - \sum_k \rho_k \left(u_k \frac{\partial H_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial H_k}{\partial r} \right), \quad (3)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \mu}{S_m} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + F_i(p, T, Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_s}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_k u_k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_k v_k r) = 0, \quad (5)$$

$$u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial r} = f_{kx}, \quad (6)$$

$$u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial r} = f_{kr}, \quad (7)$$

$$u_k \frac{\partial H_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial H_k}{\partial r} = q_k + u_k f_{kx} + v_k f_{kr}, \quad (8)$$

$$P = R \rho T \sum_i Y_i / W_i. \quad (9)$$

Уравнения (1)...(3) – это уравнения сохранения массы (уравнения неразрывности), импульса (уравнения движения в осевом направлении) и энергии для газовой составляющей струи; уравнения (5)...(9) – соответствующие уравнения сохранения для частиц конденсированной фазы с учетом членов взаимодействия с газом. В уравнениях (2), (3) взаимодействие газа с частицами проявляется в наличии

членов, содержащих параметры частиц. Изменение мольных концентраций газовых компонент в процессе химических реакций описывается уравнением (4). В уравнениях для частиц (6)...(8) это взаимодействие записывается с помощью скорости обмена импульсом f_k и теплом q_i между газом и частицами k -й группы. Уравнение (9) – уравнение состояния для смеси совершенных газов.

Так как в исследуемом процессе режим течения двухфазных потоков турбулентный, нами использовалась стандартная $K - \epsilon$ модель турбулентности Лондера – Джонса, откорректированная с учетом присутствия инерционных частиц. В рамках этой модели турбулентность описывается двумя дифференциальными уравнениями для турбулентной кинетической энергии K и ее диссипации ϵ . Было выполнено сопоставление результатов расчетов, проведенных по указанной методике, истекающих в затопленное пространство осесимметричных турбулентных дозвуковых изотермических газовых струй с экспериментальными данными, приведенными в литературе. Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения, применяемого в Институте молекулярной и атомной физики НАН Беларуси. Для всех сечений осесимметричной затопленной струи разница между расчетными данными и результатами экспериментов, описанными в литературе, составляла не более 15 %.

Теоретический анализ процесса газопламенного напыления порошков с независимым источником спутного потока (учитывали его конечный радиальный размер и угол, под которым осуществляется взаимодействие с двухфазной струей) показал, что максимальный прирост скорости возможен при углах от 25 до 40°.

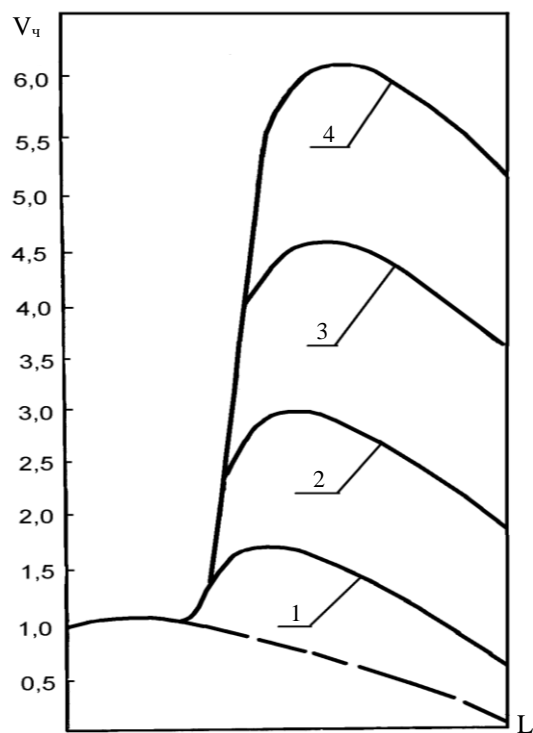


Рис. 1. Изменение относительной скорости движения частиц в осевом сечении факела при различных скоростях спутного потока:

1 – $V_{сп} = 1,2V_r$; 2 – $V_{сп} = 4,5V_r$;
3 – $V_{сп} = 7,3V_r$; 4 – $V_{сп} = 10V_r$

потока целесообразно ограничивать величиной 2300...2500 К, а давление – 0,6...0,8 МПа, так как дальнейшее повышение этих параметров незначительно влияет на тепловые и динамические параметры частиц. В качестве источника высокоэнергетического спутного потока рассматривалась камера сгорания пропановоздушной смеси. Учитывая необходимые для формирования спутного потока объемы горючих смесей, а также данные по тепловой напряженности камер и коэффициентам выделения тепла, были выполнены расчеты, показавшие, что размеры камеры при традиционном варианте сжигания смеси значительно превосходят размеры термораспылителя, т.е. компоновка камеры и термораспылителя в единую установку весьма затруднительна. Используя принцип микрофакельного сжигания газовой смеси в каналах керамического перфорированного элемента для получения выходного высокоскоростного потока, были предложены устройства, реализующие эффект микрофакельного горения в активаторах установок высокоскоростного напыления (патенты Респ. Беларусь № 4365, 14885) [5].

При равенстве объемных расходов газов в спутном потоке и основной двухфазной струе для увеличения скорости частиц размером около 50 мкм в 1,5 раза необходимо, чтобы скорость спутного потока превышала скорость основной струи всего в 1,2...1,3 раза (рис. 1). Для повышения скорости частиц в 3 раза потребуется, чтобы скорость спутного потока превышала скорость основной струи уже в 4,5 раза. Для шестикратного увеличения скорости частиц потребуется, чтобы скорость спутного потока в 10 раз превосходила скорость основной струи. Таким образом, чтобы достичь скорости частиц около 300 м/с, необходимо создать спутный поток, движущийся со скоростью 900...1000 м/с. Кроме того, чтобы спутный поток не снижал температуру частиц при напылении, необходимо его нагреть до температуры не менее 1500 К.

Анализ варианта размещения спутного потока внутри кольцевого факела пламени показал, что таким образом можно управлять процессом теплообмена между напыляемым порошком и пламенем, поскольку эффект эжектирования позволяет изменять диаметр факела: сужать факел при скорости истечения спутного потока больше скорости движения продуктов сгорания, формирующих факел; расширять факел при скорости истечения меньше скорости движения продуктов сгорания.

Для повышения скорости полета частиц до 300 м/с, согласно расчетам, необходимо сформировать спутный поток, который должен иметь температуру выше 2000 К и гиперзвуковую скорость движения. Определено, что температуру предварительного нагрева активирующего спутного

Экспериментальный образец термораспылителя с реактивным активатором был изготовлен на базе установки газопламенного напыления порошков [6]. Первичный факел образуется в результате горения рабочей смеси газопламенного распылителя, на сопловой части которого монтируется реактивный активатор. При помощи специально предусмотренного регулировочного крана, ограничивающего подачу воздуха на смесеобразование, можно создавать окислительное или восстановительное пламя в спутном высокоскоростном факеле.

Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием порошков оксида алюминия, карбида хрома, плакированного никелем, а также композиционной порошковой шихты, содержащей ферросплавы, частицы абразивного шлама, интерметаллиды и хромоникелевый сплав.

Измерения, выполненные с помощью прибора ИССО-1 показали, что максимальная скорость, развиваемая частицами наиболее легкого порошкового материала Al_2O_3 , составляет 400...440 м/с и достигается на дистанции 90...110 мм при соотношении окислителя (воздуха) и пропана $\beta = 26...28$ (рис. 2).

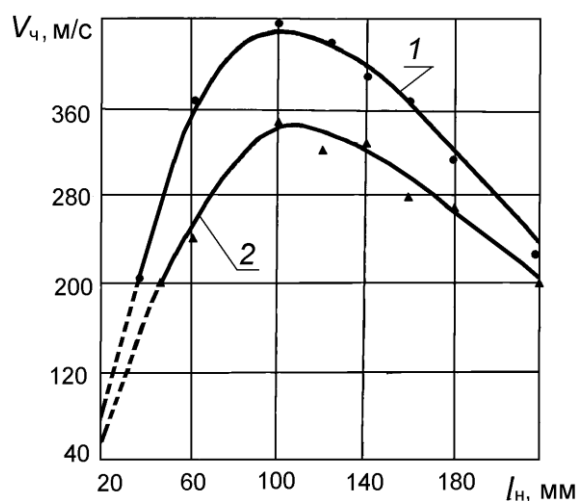


Рис. 2. Изменение скорости частиц порошков Al_2O_3 (1) и Cr_3C_2 (2) по длине факела

На основании анализа конструкций и эксплуатационных характеристик оборудования для газопламенного проволоочного напыления, а также с учетом специфики условий эксплуатации оборудования на отечественных предприятиях была разработана установка для напыления проволоочных материалов [7]. Поток распыляющего воздуха является спутным по отношению к факелу, в котором нагревается до плавления материал проволоки. Наибольшее влияние на скорость полета частиц распыленной проволоки и их размер должны оказывать расход и давление воздуха (при условии сохранения оптимальных режимов горения факела и скорости подачи проволоки). Это подтвердилось результатами экспериментов, проведенных при давлении воздуха от 0,4 до 0,6 МПа. Максимальное увеличение значений скорости полета частиц наблюдается с повышением расхода распыляющего воздуха от 0,20 до 0,36 м³/мин, при этом увеличивается и количество мелких фракций, обуславливающее плотность наносимых покрытий. Таким образом, увеличив давление воздуха, можно повысить скорость частиц, но стандартные заводские сети рассчитаны на давление до 0,65 МПа.

Было предложено активировать процесс напыления покрытий формированием в распыляющем воздушном потоке акустических колебаний, которые передаются распыляемой проволоке (патент Респ. Беларусь № 5768). Для этого в распылительной головке выполнен газоструйный излучатель Гартмана, генерирующий в распыляющей струе высокочастотные колебания (≈ 30 кГц) с уровнем звукового давления 120...135 дБ. Разработана оригинальная методика, позволяющая исследовать процесс акустического воздействия распыляющего потока на размер распыляемых частиц. Установлена зависимость количества частиц мелких фракций от частоты генерируемых колебаний и уровня звукового давления.

Выполнена оценка влияния дистанции напыления, размера распыленных частиц (рис. 3) и свойств материала на пористость и адгезию покрытий. Определено, что у покрытий из сталей, бронз, алюминия и его сплавов наблюдается снижение прочности сцепления на отрыв с 22...30 до 15...18 МПа с увеличением средних размеров распыленных частиц с 30 до 100 мкм. При распылении нихрома и молибдена повышение среднего размера распыленных частиц с 15 до 100 мкм позволяет повысить прочность сцепления с 23...27 до 40...46 МПа, что свидетельствует о нецелесообразности использования акустической активации при напылении данных материалов.

Оценка величины плотности теплового потока при газопламенном напылении порошков из термопластичных полимеров показала, что для эффективного процесса формирования покрытий из полимеров с различными теплофизическими характеристиками необходим термораспылитель, обеспечивающий управление процессом теплообмена в системе «факел – частица полимера» точной регулировкой плотности теплового потока в пределах $(1...3) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Для обеспечения эффективного процесса нанесения покрытий из порошков, получаемых криогенным измельчением полимерных гранул, вторичных полимеров и отходов производства синтетических волокон, был разработан термораспылитель ТЕРКО-П (патенты Респ. Беларусь № 223, 1652, 7926, патент РТ № ТЖ № 89), удовлетворяющий поставленным условиям [8]. В конструкции термораспылителя использован эффект эжектирования (газодинамической активации), возникающий при изменении соотношения скоростей выхода компонентов горючей смеси (V_r) и воздуха в спутном потоке, движущемся в зазоре между мундштуком и сопловым наконечником ($V_{сп}$) (рис. 4).

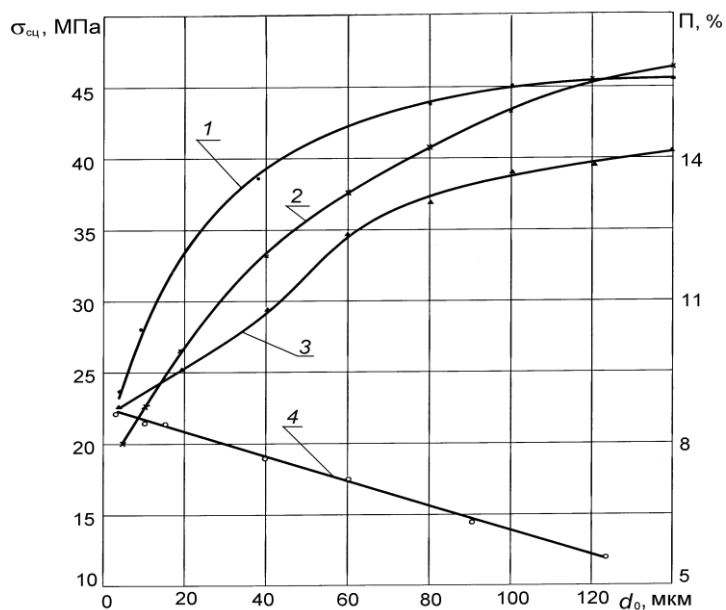


Рис. 3. Влияние среднего размера частиц распыленных проволок на прочность сцепления (1, 2, 4) и пористость (3) покрытий

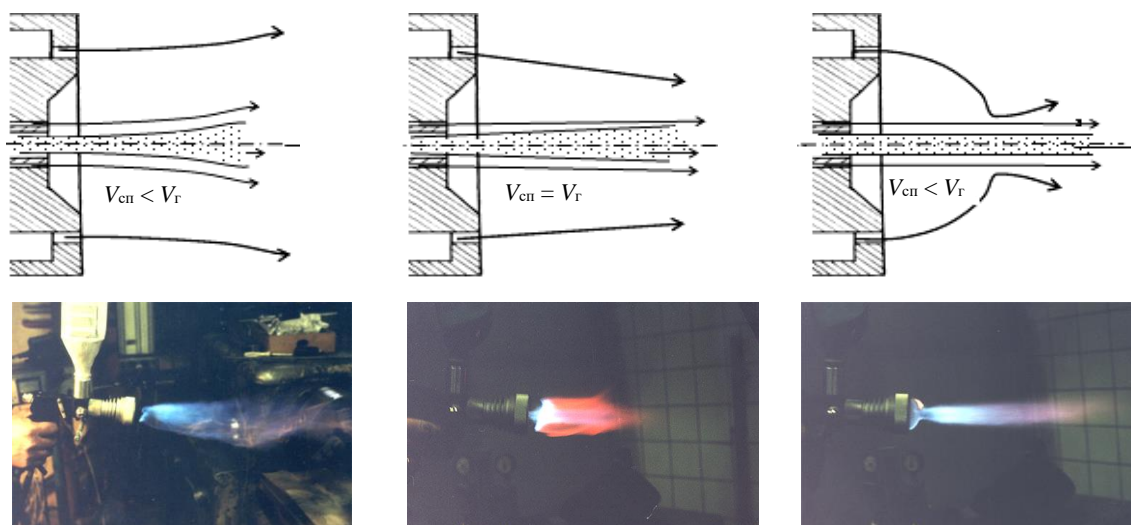


Рис. 4. Формы факела в зависимости от степени газодинамической активации

Поток воздуха является газодинамическим активатором, с помощью которого изменяется форма факела и появляется возможность регулировать условия теплообмена между факелом и порошком.

Использование этого эффекта позволило наносить покрытия порошками термопластов с температурой плавления 360...650 К при производительности до 2,9 кг/ч. Методом инфракрасной спектроскопии установлено, что при формировании покрытий с помощью разработанного оборудования порошками из отходов производства полиэтилентерефталата ($T_{пл} = 370...390$ К) окислительная деструкция поверхности незначительна.

Анализ процесса распыления полимерных шнуров [9] показал, что необходимо создать такую схему распыления, при которой нагрев и диспергирование шнура осуществляются одной струей газа. Установлено, что для исключения процесса деструкции распыляемого полимерного шнура необходимо, чтобы плотность теплового потока струи составляла $(1,0...1,5) \cdot 10^4$ Вт/м², а ее скорость была не менее 450 м/с. Разработаны способ газопламенного распыления полимерных шнуров (патенты Респ. Беларусь № 10711, 12620) и устройство для его реализации (патенты Респ. Беларусь № 2996, 7025), использующее камеру микрофакельного сжигания пропановоздушной смеси (рис. 5).



Рис. 5. Термораспылитель для нанесения покрытий распылением полимерных шнуров

Впервые в практике ГПН получены покрытия распылением полимерных шнуров-экструдатов. Экспериментальные исследования позволили установить следующие наиболее рациональные параметры напыления [10]:

- расход пропана 0,4...0,6 м³/ч;
- давление газов в камере сгорания 0,25 МПа;
- диаметр распыляемых экструдатов из термопластов 3 мм;
- скорость подачи экструдатов 0,019...0,021 м/с;
- толщина наносимых покрытий 300...400 мкм.

Заключение. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработано оборудование для активированного газопламенного напыления металлических, полимерных, композиционных, слоистых покрытий из порошковых и проволоочных материалов, оснащенное термораспылителями для высокоскоростного напыления порошков, для нанесения покрытий из порошков материалов с теплопроводностью 2...5 Вт/м·град, для нанесения покрытий порошками термопластичных полимеров с диапазоном температур плавления от 360 до 570 К и распылением полимерных шнуров, с акустическим активатором процесса распыления проволок. Выполненные исследования позволили разработать технологические процессы активированного газопламенного напыления износостойких, коррозионно-стойких, антифрикционных покрытий из порошковых и проволоочных материалов на быстрознашивающиеся элементы конструкций и детали транспортных машин, технологического оборудования, сельскохозяйственной техники с повышением срока их службы в 1,4...8 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю.С. Коробов [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 13-й междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – Ч. 1. – С. 164–171.
2. Marantz, D.R. New contender in metal spraying / D.R. Marantz, K.A. Kowals // Welding Journal. – 1991. – № 8. – P. 46–50.

3. Абрамович, Г.Н. Двухфазная струя в спутном потоке / Г.Н. Абрамович, В.И. Бажанов, Т.А. Гиршович // Турбулентные двухфазные течения. – Таллин: Академия наук ЭССР, 1976. – С. 47–68.
4. Витязь, П.А. Теоретические предпосылки активирования процесса газопламенного напыления спутными потоками / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск: Белорус. наука, 2010. – Вып. 33. – С. 232–241.
5. Черепко, А.Е. Технологии гиперзвуковой металлизации / А.Е. Черепко, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Механика-2011: сб. науч. докл. V белорус. конгр. по теорет. и прикл. механике, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 138–143.
6. Разработка оборудования для высокоскоростного газопламенного напыления порошков / М.А. Белоцерковский [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 13-й междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, 12–15 апр. 2011 г.: в 2 ч. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – Ч. 1. – С. 49–51.
7. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное распыление проволочных материалов / М.А. Белоцерковский // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 11–15.
8. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск: Технопринт, 2004. – 200 с.
9. Korobov, Yu. Modeling of Flame Spraying of Polymer Wire with Nanofillers / Yu. Korobov, M. Belotserkovski, A. Chekulaev // Mathematical modeling and computer simulation of material technologies / Int. Conf. MMT-2008, Israel, sept. 08–12, 2008. – Israel, 2008. – P. 2-65–2-71.
10. Белоцерковский, М.А. Повышение долговечности узлов трения скольжения сельскохозяйственных машин газопламенным напылением полимерных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, А.И. Камко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 12. – С. 2–7.

Поступила 05.12.2013

RATIONAL ACTIVATING OF THE FLAME SPRAYING PROCESSES OF METALS AND POLYMERS

M. BELOTSERKOVSKY

It is founded on accordance of adding material costs of hardened or renovated parts. It was substantiated theoretically and confirmed experimentally the possibility to intensify significantly of dynamic parameters for two-phase jet and heat exchange in the system “torch – particles” at the expense of activating by concurrent flows, that allowed to develop the equipment and processes of coating with needed features by spraying: powders with thermal conductivity (2...5) Wt / m-K, mixtures of metal powders and ceramic powders, thermo-plastic polymer with a melting point of 360 to 550 K, polymer-governmental cords, metal wires.