

УДК 621.793

РАЦИОНАЛЬНОЕ АКТИВИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ

(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены методы рационального активирования процессов газопламенного напыления защитных, износостойких покрытий порошковыми и проволочными материалами, позволяющие расширить области применения технологии напыления при небольшом увеличении удельной стоимости.

Введение. Расширение номенклатуры восстанавливаемых или упрочняемых деталей и повышающиеся требования к свойствам наносимых покрытий вызывают необходимость расширения области применения и возможностей методов газотермического напыления (ГТН), разработки новых способов и устройств, активирующих процесс напыления и повышающих качество покрытий. Прежде всего это касается газопламенного напыления (ГПН), простота и легкость реализации которого способствовали его широкому внедрению, а диапазон использования без применения каких-либо активирующих приемов остается крайне узким.

Установлено [1], что основным направлением повышения показателей качества покрытий и увеличения долговечности упрочняемых или восстанавливаемых деталей является применение тех приемов активации, которые действуют в процессе напыления, а именно интенсифицируют процессы теплообмена в системе «факел - частица», увеличивают скорость частиц, позволяют уменьшать размер частиц (при распылении проволок или прутков), или тех, которые позволяют модифицировать напыленный слой.

Приемы активации, увеличивающие скорость частиц, являются одними из наиболее эффективных и широко применяются при создании сверхзвуковых систем ГПН. Сущность всех процессов сверхзвукового газопламенного напыления заключается в том, что за счет сгорания углеводородных топлив в камере ракетного типа при определенных условиях формируется высокоскоростная струя, в которую подают напыляемый материал. При этом расходы газов возрастают по сравнению с традиционным газопламенным напылением в 5... 12 раз [2, 3].

Цель исследований. В последние годы, важнейшей задачей в области исследования процессов и явлений, протекающих при газопламенном напылении, явилось изыскание новых приемов (или их совокупности) активации, позволивших совершить качественный скачок в свойствах покрытий и диапазоне наносимых материалов.

Однако обеспечиваемый за счет использования активированного напыления эффект не всегда адекватен тем затратам, за счет которых он достигнут.

В работе [4] приведена зависимость прочности сцепления покрытий с основой от себестоимости, которая показывает, что для увеличения адгезии в 5 раз необходимо было в 12 раз повысить удельные энергозатраты.

К аналогичным выводам приводит оценка изменения удельной стоимости процессов напыления с увеличением скорости газопорошкового потока (рис. 1). Причем при подсчетах удельной себестоимости не учитывалась стоимость оборудования, на котором реализуется процесс (амортизационные отчисления) и заработная плата обслуживающего персонала. С учетом амортизационных расходов удельная стоимость, например, HVOF - процесса («High-Velocity Air Fuel») [5] возрастает в полтора раза.

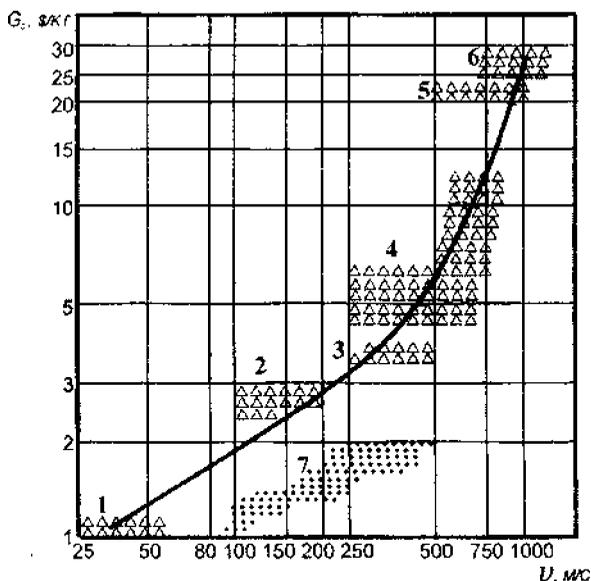


Рис. 1. Изменение удельной стоимости процессов напыления с увеличением скорости газопорошкового потока:

- 1 - традиционное газопламенное напыление;
- 2 - плазменное напыление; 3 - AC-HVOF-процесс («Activated Combustion High-Velocity Air Fuel»), 4 - HVOF - процессы («High Velocity Oxygen Fuel»); 5 - сверхзвуковое плазменное напыление; 6 - детонационное напыление; 7 - методы рационального активирования

Согласно этой оценке, и учитывая относительно высокие цены на порошковые материалы, следует, что многие детали технологического оборудования отечественных предприятий просто не целесообразно восстанавливать или упрочнять с использованием современных технологий высокоскоростного газопламенного напыления.

Уровень экономики стран СНГ и технического развития промышленного производства накладывают жесткие ограничения на возможности реализации разрабатываемых приемов активации процесса ГПН. Целесообразность их использования должна прежде всего отвечать требованиям отечественных предприятий, а затраты на освоение соответствовать решаемым проблемам. Значит, речь может идти только о разработке рациональных методов активирования и соответствующих технических средств, реализующих эти методы.

Результаты исследований. Разрабатывая приемы рационального активирования, прежде всего необходимо было сформулировать ограничения, обусловленные техническим уровнем и возможностями предприятий - предельно допустимыми показателями цеховой газовой разводки и передвижных газовых постов, ценами на наносимые материалы, стоимостью восстанавливаемых или упрочняемых деталей, стоимостью предварительной и последующей механической обработки и т.п. [6].

Исходя из этого, зачастую следовало, что для достижения близких по значениям свойств покрытий более эффективно будет обеспечить повышенный теплообмен между частицами и факелом, нежели увеличить скорость частиц до скорости звука. Кроме того, высокую износостойкость, твердость и другие поверхностные свойства покрытий иногда целесообразно обеспечивать методами термоупрочнения или модифицирования (рис. 2).

В Институте механики и надежности машин (ИМИНМАШ) НАН Беларуси выполняются работы по созданию термораспылительных систем, отвечающих вышеперечисленным требованиям и обеспечивающих:

- формирование скоростных (100 м/с) и высокоскоростных (более 300 м/с) потоков при газопламенном напылении порошковых материалов;
- активированное газопламенное распыление проволочных материалов;
- активированное напыление полимерных покрытий.

Кроме того, разрабатываются методы термообработки, микроплазменной обработки напыленных покрытий и их модификации высокоэнергетическим насыщением поверхностного слоя атомами внедрения.

При напылении на наружные поверхности наиболее простым методом повышения динамических параметров газопорошкового потока является активация газовыми струями, обжимающими факел пламени и ускоряющими полет частиц. Разработанный в ИМИНМАШ воздушный активатор выполнен таким образом, чтобы угол атаки струи воздуха по отношению к оси факела пламени мог изменяться от 0 до 70°. С увеличением угла атаки струй от 0° до 30° скорость полета частиц на дистанции 100... 150 мм возрастает, достигая своего максимума при углах атаки ~30°, т.е. на расстоянии 100 мм от среза сопла термораспылительного пистолета. Дальнейшее изменение угла снижает скорость, и при углах более 55° струи оказывают тормозящее действие. Повышение давления воздуха от 0,2 до 0,65 МПа вызывает пропорциональное увеличение скорости частиц.

Достаточно сложную задачу представляет собой формирование методом ГПН покрытий из порошковых материалов с низкой теплопроводностью. С одной стороны, нельзя увеличить температуру пламени, с другой - невозможно уменьшить скорость полета частиц для улучшения условий их нагрева без снижения величины теплового потока факела.

Учитывая эти ограничения и потенциальные возможности отечественных изготовителей оборудования для ГПН, решалась задача разработки методов и устройств, позволяющих при минимальных дополнительных затратах напылять порошковые материалы с низкой теплопроводностью.

Используя явление «отрыва пламени», когда скорость истечения горючей смеси из сопла на определенную величину превышает скорость горения данной горючей смеси, было предложено образовывать вторичный факел на некотором расстоянии от сопла термораспылителя за счет высокой скорости истечения рабочей смеси газов [7]. Расстояние, на котором горит вторичный факел, зависит от того, насколько скорость истечения струи больше скорости горения данного горючего газа в турбулентном потоке. Первичный факел формировали путем сгорания ацетилен-кислородной смеси (пропан-бутан-кислородной смеси), вторичный - при сгорании пропан-бутан-кислородной смеси, подаваемой с расходом около 7 м³/ч. Активную зону факела удалось увеличить более чем на 100 мм.

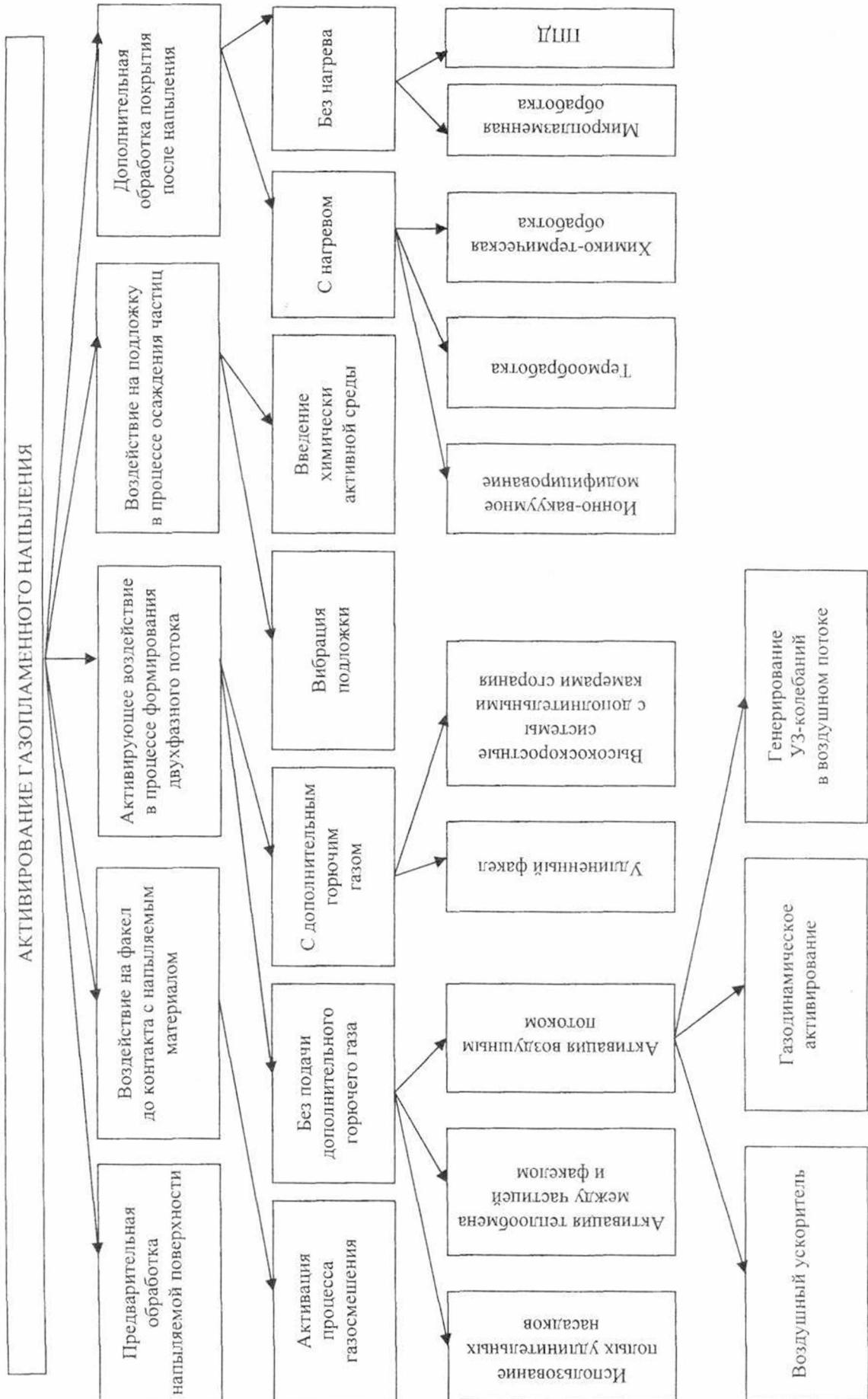


Рис. 2. Варианты рационального активирования процесса ГПН

При газопламенном напылении проволочных материалов существенное влияние на качество покрытий оказывает конструкция распылительной головки пистолета для напыления. Практически во всех известных газосмесительных устройствах горелок для газопламенного напыления горючий газ и кислород смешиваются в гладких прямых каналах, где невозможно развитое турбулентное течение газовой смеси. Это снижает качество покрытий, особенно при работе на пропан-бутане, имеющем более высокую, по сравнению с ацетиленом, плотность и вязкость. Используя явление «вторичной циркуляции» при течении смеси в изогнутых каналах, было разработано газосмесительное устройство для установки проволочной «ТЕРКО», в котором горючий газ и кислород движутся по пересекающимся винтовым траекториям. Благодаря этому, обеспечивается создание развитого турбулентного течения при $Re - (7,1 \dots 7,8)10^3$. Для большей интенсивности перемешивания рабочих газов было предложено разделить полость газосмесительной камеры пористыми перегородками.

Для получения мелкодисперсного распыла, кроме точного соблюдения режимов напыления, необходимо строгое соответствие глубины камеры под воздушной головкой (обжимным соплом) распыляемому материалу и применяемому горючему газу, т.е. определенная длина зоны воздействия газовых потоков на проволоку. Для установки «ТЕРКО» было разработано устройство, позволяющее изменять объем воздушной камеры без замены воздушной головки [8].

С целью обеспечения формирования струи с равномерной грануляцией относительно мелких частиц при распылении проволок из тугоплавких металлов и сплавов было предложено генерировать в обжимающем газовом (воздушном) потоке высокочастотные акустические колебания с высоким уровнем звукового давления [9]. Акустическое воздействие распыляющего потока препятствует вытягиванию расплавленного металла в нить и вызывает отрыв капель металла с поверхности и вершины конуса плавящегося участка проволоки. Оторвавшиеся капли разрушаются турбулентными пульсациями давления, вызванными мощным звуковым полем. Исследование влияния акустического воздействия на воздушный поток при распылении стальной проволоки и на механизм образования распыляемых частиц показало, что для получения частиц размером 5...15 мкм в количестве (n_x) 85...90 % от их общего количества (n) необходимо генерировать колебания с частотой 24...48 кГц. Повышение уровня звукового давления позволяет увеличить n_x , причем максимальные значения n_x достигаются при меньших частотах генерируемых колебаний.

В настоящее время в Беларуси освоено крупнотоннажное производство термопластичных полимеров, а также разработана установка их криогенного диспергирования. Невысокая себестоимость местного сырья и организация производства по переработке в порошок низкоплавких (температура плавления 100... 140 °С) полимеров открывают новые перспективы для использования процессов ГПН в различных отраслях промышленности. Однако традиционно используемое оборудование нельзя применять для газопламенного напыления указанных термопластов, поскольку в высокотемпературной газокислородной струе эти порошки подвергаются термоокислительной деструкции.

Для обеспечения эффективного процесса газопламенного нанесения покрытий из отечественных полимерных порошковых материалов разработан термораспылитель, обеспечивающий возможность управления теплофизическими и геометрическими характеристиками факела путём изменения соотношения скоростей выхода воздушно-пропановой смеси и спутного потока воздуха в зазоре между мунштуком и сопловым наконечником [10]. Данный поток воздуха выполняет функцию газодинамического активатора, способного изменять форму факела за счёт его инъекции. Это позволяет управлять процессами теплообмена, возникающими между факелом и частицами порошка.

С целью расширения возможностей традиционного газопламенного напыления и повышения физико-механических свойств получаемых покрытий в ИМИНМАШ НАН Беларуси разработана новая установка газопламенного напыления, содержащая реактивный активатор, обеспечивающий формирование высокоскоростной струи. Основным элементом активатора является малогабаритная камера, способная формировать высокоскоростной поток продуктов сгорания пропано-воздушной смеси, который фокусируется в зоне дос тижения частицами напыляемого материала максимальной температуры от основного факела [11]. Первичный факел образуется в результате горения рабочей смеси газопламенного распылителя «УПТР-1-90», на сопловой части которого монтируется реактивный активатор. Одним из преимуществ предлагаемой конструкции является использование для охлаждения рабочих поверхностей реактивного устройства сжатого воздуха, часть которого затем отводится в приемный коллектор камеры сгорания. Это позволяет улучшить условия воспламенения горючей смеси и повысить температуру пропано-воздушного пламени. Использование многосопловой керамической вставки внутри камеры в совокупности с воздушным регенеративным охлаждением обуславливает небольшие габаритные размеры активатора. При помощи специально предусмотренного регулировочного крана, ограничивающего подачу воздуха на смесеобразование, можно создавать либо окислительную, либо восстановительную ат-

мосферу вторичного пламени. Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием композиционной порошковой шихты, содержащей ферросплавы, частицы абразивного шлама, интерметаллиды и хромоникелевый сплав. Напыленные покрытия имели пористость менее 5 % и прочность сцепления более 45 МПа.

Заключение. Выбор метода восстановления деталей машин зависит от многих факторов, но при возможности получения близких по свойствам покрытий различными способами критерием выбора становится экономический показатель. Разработанные в ИМИНМАШ НАН Беларуси методы и технические средства активированного напыления позволяют при незначительном увеличении себестоимости расширить возможности процесса ГПН и использовать материалы, которые ранее наносились только с помощью высокоэнергетических способов формирования покрытий,

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильюшенко и др. - Мн.: Беларуская навука, 1998. - 583 с.
2. The next generation in spray technology // Powder Metallurgy International. - 1992. - V, 24, № 6, - P, 379,
3. HVOF Sprayed coating containing heat resistant inter metallic molybdenum phases / B, Formarek, St. Serkowski, K. Szopinski, R. Mania // Films and Coatings-98: Proceeding Inter, conf. - S-Petersburg, 1998.-P.215-217.
4. Ильюшенко А.Ф. Ресурсосберегающие технологии упрочнения и восстановления конструкционных деталей с использованием газотермических методов нанесения покрытий // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. Новополоцк: ПГУ; Мн.: Технопринт, 2001. - С, 17 - 22.
5. Intelli - Jet. Activated Combustion HVOF System. - Uniquocoat Technologies. - Ashland, - USA. - 2001.- 8 p.
6. Белоцерковский М.А. Повышение качества газопламенных покрытий методами рационального активирования // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. тр. - Донецк: ДГТУ, 2002. - С. 47 - 52.
7. Белоцерковский М.А., Лопата В.Н. Газопламенное напыление материалов с низкой теплопроводностью комбинированным факелом // Сварка и родственные технологии. - 2001. - № 4. - С. 88 - 91.
8. Белоцерковский М.А. Активированное газопламенное распыление проволочных материалов // Весці НАН Б. Сер. фіз.-тэхн. навук. - 2002. - № 1. - С. 11 - 15.
9. Положительное решение по заявке № И 20000194 от 16.04.2001 г. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, И.Л. Пунтус, П.Г. Сухоцкий.
10. Белоцерковский М.А., Федаравичус А,В, Разработка технических средств для газопламенного напыления полимерных покрытий // Машиностроитель. -2002. № 12. - С. 13 - 15.
11. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты) / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Патент РБ № 4365; Оpubл. 30.03.2002 г.