



## ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАСАДОК

А. П. МУРАШОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Использование специальных насадок при газотермическом напылении уменьшает количество неуправляемых факторов, влияющих на процесс, повышает скорость истечения струи, снижает степень взаимодействия ее с окружающей атмосферой, уменьшает угол раскрытия. Приведены рекомендации для конструирования насадок, показана эффективность применения их при нанесении покрытий.

*Ключевые слова:* газотермическое напыление, покрытия, применение насадок, высокотемпературная газовая струя, распределение скорости, средняя температура области, напыляемые частицы, газодинамическое воздействие

Газотермическое нанесение (ГТН) покрытий относится к универсальной технологии, которая позволяет получать и применять покрытия из металлов, керамики, пластмасс и их композиций [1]. Такие возможности ГТН предопределили развитие процесса, создание большого количества напылительных устройств, разработку материалов для напыления, получение слоев со многими функциональными свойствами: от износостойких, антифрикционных, теплозащитных, электроизолирующих и прочих до покрытий с наноструктурами, с заданной пористостью, другими специальными свойствами [2–6].

При ГТН формирование покрытий происходит из отдельных частиц за счет их химической и физической активности, которая повышается в результате нагрева и ускорения. В таком активном состоянии частицы могут взаимодействовать с элементами напыляющей струи, окружающей газовой средой, подложкой. Благодаря активности напыляемого материала возможно его окисление, степень которого определяется многими факторами, в том числе способом напыления.

В случае применения обычной электродуговой металлизации окисление материала покрытия происходит при распылении проволок воздухом, при полете частиц и формировании покрытия [7]. С целью защиты от окисления, снижения кислорода в покрытии разработаны методы распыления проволок с применением инертных газов. Появились методы активированной (рис. 1), сверхзвуковой металлизации [8–11].

Применение защитной или восстановительной среды при электродуговой металлизации способствует повышению качества покрытий за счет снижения содержания оксидов, а при сверхзвуковой металлизации уменьшается время полета час-

тиц, снижается вероятность взаимодействия поверхности разогретых частиц с атмосферным кислородом, повышается плотность покрытий.

Высокоскоростное газопламенное и детонационное напыление характеризуются малым взаимодействием напыляемого материала с окружающей средой благодаря применению насадки в виде ствола и сверхзвуковой скорости напыляемых частиц. Однако использование для нагрева и разгона частиц продуктов сгорания горючих газов и кислорода создает условия для взаимодействия материала с кислородом напыляющей среды.

Для снижения степени окисления применяют избыток газа, создавая восстановительную среду, однако это не всегда возможно по технологическим соображениям.

При истечении плазменной высокотемпературной струи из плазмотрона в неподвижную окружающую среду в результате термического сжатия дуги и струи в плазмотроне возникает давление, которое при выходе из плазмотрона превышает давление в окружающей среде. Это приводит к расширению струи, причем на самом срезе плазмотрона ее расширение быстрее, чем на остальном участке, где разница давлений постепенно снижается [12]. Турбулентное перемешивание и вязкое трение напыляющей струи приводят к повышению содержания в ней окружающих газов, по-

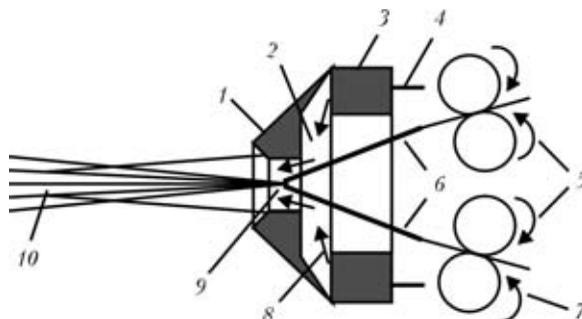


Рис. 1. Схема активированной электродуговой металлизации [8]: 1 — сопло; 2 — коллектор; 3 — камера сгорания; 4 — смесь воздуха с горючим газом; 5 — подающий механизм; 6 — направляющие; 7 — проволоки; 8 — распыляющий газ; 9 — дуга; 10 — струя

являются области с градиентом температуры и скорости в радиальном сечении струи. В формировании покрытия участвуют с разной степенью нагретые и ускоренные частицы из напыляемого материала, ожидаемых синтезируемых соединений или фаз, которые при этом могут неконтролируемо взаимодействовать с газами окружающей атмосферы. Такое взаимодействие можно отнести к неуправляемым факторам, влияющим на состав и свойства покрытий, которые получают при свободном истечении (затопленной) струи.

При наличии сопутствующего потока газа, как и в первом случае, степень расширения струи определяется разницей давлений в этих потоках. При незначительной разнице давлений в них степень перемешивания газовых сред уменьшается, образуется газовая защита основной струи. Создаваемый при подаче сопутствующего газа промежуточный слой не исключает возможности подмешивания в него окружающей атмосферы, но ограничивает или защищает напыляющую струю от взаимодействия с компонентами атмосферы.

При использовании насадки и сопутствующего защитного газа стремятся защитить насадку от проникновения в нее окружающей атмосферы и последующего перемешивания. При этом снижается риск образования областей с большим градиентом температуры, скорости. Как видно из рис. 2, применение насадки приводит к увеличению средней скорости потока, снижается градиент скорости и энthalпии по поперечному сечению струи в центре и на периферии.

Возможность взаимодействия напыляющей струи с окружающей средой определяет особенности нанесения покрытий при и без использования насадки. При этом учитываются не только свойства напыляющей струи, но и вид напыляемого материала. При напылении покрытий с использованием порошков они могут содержать частицы разных размеров, формы либо состоять из частиц с различной плотностью.

Как известно, силовое воздействие потока на частицу  $R$  определяется плотностью  $\rho$ , скоростью потока  $v$ , коэффициентом газодинамического (лобового) сопротивления  $C_d$ , эффективной площадью воздействия  $S_q$ :

$$R = C_d \rho v^2 / 2 S_q.$$

Коэффициент лобового сопротивления частицы зависит от ее формы. Для частиц некруглой формы Р. Бусройд [14] предложил использовать степень несферичности  $\Phi$ , определяемую отношением площади поверхности сферы с объемом, равным объему частицы  $V_q$ , к площади поверхности частицы, увеличение которой вызывает возрастание коэффициента лобового сопротивления:

$$\Phi = \pi \left( 6V_q / \pi \right)^{2/3} S_q^{-1}.$$

Для частиц чешуйчатой формы при различной ориентации, кроме изменения коэффициента лобового сопротивления, ускорения, могут возникать боковые составляющие от газодинамического воздействия струи на такие частицы, в результате чего часть их попадает на периферию струи. При применении затопленной струи это снижает степень нагрева таких частиц, влияет на их ускорение, предопределяет появление в структуре покрытия непрогретых частиц, что снижает качество покрытий. Если при напылении покрытий с использованием сферических порошков контроль над процессом обеспечивает незначительное отличие нагрева и ускорения частиц разных размеров, то при использовании частиц осколочной или чешуйчатой формы количество непрогретых или окисленных частиц неконтролируемо возрастает, ухудшается качество покрытий, снижается коэффициент использования материала.

Использование насадки и сопутствующего защитного газа ограничивает или предотвращает взаимодействие струи с окружающими газами, выравниваются температура и скорость струи по сечению, увеличивается протяженность высокотемпературной области. Это сказывается на степени нагрева, ускорении частиц, особенно частиц

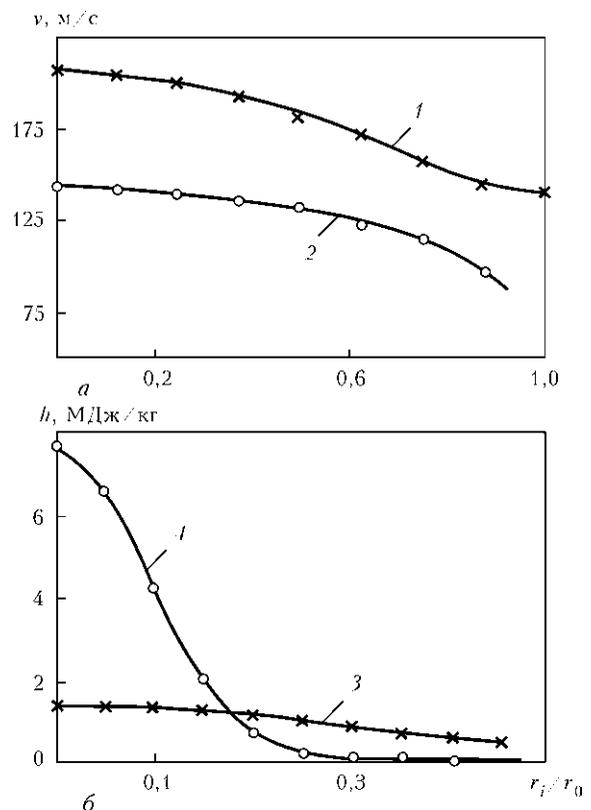


Рис. 2. Распределение скорости (а) и энthalпии (б) частиц по радиусу пятна напыления при использовании насадки (1, 3) и без нее (2, 4) [13]

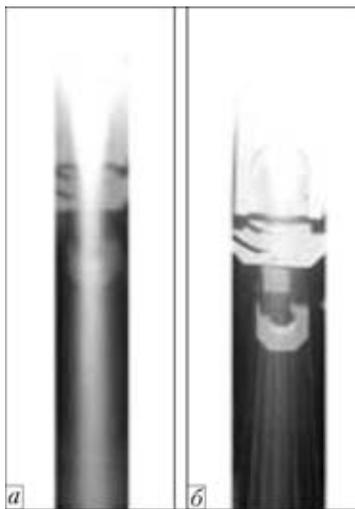


Рис. 3. Вид плазменной струи при напылении металлического (а) и керамического (б) порошков

с большой разницей размеров, разной плотности или неправильной формы.

Отрицательный момент при оснащении насадки заключается в невозможности визуально контролировать расход транспортирующего газа с порошком по форме напыляющей струи, возможности налипания напыляемого материала на боковую поверхность насадки с образованием «настыли», подсоса холодного воздуха внутрь насадки. Эти недостатки приводят к неудобству в работе, ухудшают технологичность процесса, ограничивают применение насадок в промышленности.

В работах [15, 16] приведены схемы существующих насадок. Рассмотрены конструкции, проведена классификация насадок по экономическим и технологическим показателям, проанализированы их особенности и эффективность защиты.

В работе [13] приведен вариант насадки с подачей защитного газа в ее нижней части и отсосом газа. Такое решение, а также использование «горячей внутренней стенки» понижает содержание кислорода в покрытии, позволяет повысить среднюю скорость и температуру напыляемых частиц.

В работе [17] приведена насадка, сконструированная для увеличения скорости истечения напыляющей струи и снижения подсоса окружающей атмосферы внутрь насадки. Как показал опыт эксплуатации, для обеспечения ее функций требуется большой расход (более  $90 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) периферийного газа.

В приведенных конструкциях насадок невозможно избежать как отложения напыляемого материала на боковых стенках насадок, так и подсоса окружающей атмосферы внутрь насадки.

Таким образом, в области конструирования защитных насадок отсутствуют критерии, определяющие оптимальность конструкций, ее способность обеспечивать повышение качества покрытий путем снижения уровня окисления материала, за счет отсутствия плохо прогретых частиц при

его формировании. В данной работе предпринята попытка разработать насадку, конструкция которой обеспечила бы качественное напыление покрытием без налипания напыляемого материала на внутреннюю стенку насадки при угле раскрытия, равном или меньшем углу раскрытия напыляющей затопленной струи, уменьшила или исключила наличие плохо прогретых частиц в покрытии, снизила бы содержание кислорода в покрытии. Кроме того, предполагалось повысить скорость истечения струи и скорость напыляемых частиц.

Для выбора формы насадки использовали опыт создания конструкций насадок [15, 16], а также закономерности истечения газовых струй, приведенные в работах по газовой динамике [18, 19]. С целью повышения скорости истечения газа внутренняя поверхность насадки должна представлять сужающийся и расширяющийся конус. В качестве сужающей может быть использована цилиндрическая поверхность с подачей сопутствующего газа, который при рабочих расходах образует клин при входе в конус. При этом может создаваться критическое сечение и обеспечиваться условие ускорения струи. Кроме того, полагаем, что при подаче сопутствующего газа будет формироваться пристеночный газовый слой и защищать внутреннюю поверхность насадки от налипания напыляемого материала, а наличие избыточного давления в слое будет препятствовать проникновению внутрь атмосферных газов.

Угол расширения конической части выбирали исходя из формы напыляющей струи, получаемой в случае напыления металлического и керамического порошков при свободном истечении плазменной струи. На рис. 3 показан вид напыляющей струи при использовании порошков ПТ-НА-01 (95Ni+5Al), фракцией +10–45 мкм и электрокорунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  марки 15А со средним размером частиц 28 мкм. Угол раскрытия струи составлял 4 и  $8^\circ$  соответственно. Внутренний диаметр цилиндрической части равен 12...14, длина 15 мм. Для конической части насадки принят угол раскрытия, равный  $6,5^\circ$ . Ее минимальный внутренний диаметр выбран больше внутреннего диаметра цилиндрической части на 0,5 мм. При этом поперечные размеры конуса составляют значение, равное сумме диаметра струи в этом сечении и величины зазора 1...1,5 мм для подачи сопутствующего газа.

Длина насадки составляет 90 мм, что при обычно используемой дистанции напыления 100...140 мм дает возможность контролировать процесс и снижает риск взаимодействия струи с окружающей средой.

С целью образования равномерно распределенного пристеночного слоя сопутствующий газ подавался по кольцу благодаря выборке на сопле (рис. 4).

В одном из вариантов цилиндрическая часть была выполнена в виде электроизоляционной вставки, что исключало возможность дугообразования между катодом и насадкой. Однако при использовании плазмообразующей среды аргон или аргон—азот дугообразование не происходит.

При транспортировании мелкого или плохо сыпучего порошка из-за возможного образования «пробок» устанавливают повышенный расход транспортирующего газа. При выходе из подающего штуцера, диаметр канала которого значительно меньше внутреннего диаметра трубопровода-порошковода, скорость частиц достигает значения, при котором они могут пролетать центральную часть струи. Попадая в периферийную зону струи, частицы могут налипать на внутреннюю поверхность насадки или пролетать зону нагрева и не участвовать в формообразовании покрытия.

Для снижения скорости частиц порошка при подаче его в плазматрон при повышенном расходе транспортирующего газа подающий поток предварительно разделили на два канала. Порошок по каналам вводили в плазматрон через два штуцера [3], расположенных симметрично в одной плоскости с осью струи. Для повышения эффективности нагрева и предотвращения налипания частиц на внутренней поверхности сопла порошок подавали в точку пересечения оси струи и линии среза плазматрона под углом  $-6...-30^\circ$  навстречу основной струе. При напылении покрытий из смеси порошков, имеющих разную температуру плавления, например, из металла и керамики, применяли раздельную подачу порошков в разные точки ввода. Место ввода порошка предварительно определяли, используя программу расчета траектории полета и температуры частиц.

По компьютерной модели процесса плазменного напыления, проведенного с помощью системы CASPSP [20], предварительно выбраны условия подачи металлического (Ni) и керамического ( $Al_2O_3$ ) порошков.

При вводе металлической частицы под углом  $-6...-30^\circ$  и керамической частицы под углом  $-30^\circ$  при расходе транспортирующего газа  $0,12...0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$  траектория частиц располагалась в центральной области струи, что соответствовало условию их нагрева от твердого состояния до состояния расплава. При этом расплавление частиц происходит на расстоянии около 20 мм от среза сопла.

Для получения покрытий, содержащих металлическую и керамическую составляющие, применяли двойную систему подачи для керамического и металлического порошков, которая содержала два питателя и два канала с двумя вводами. Это поз-

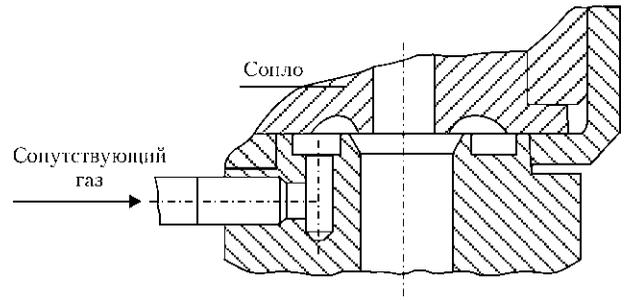


Рис. 4. Схема подачи сопутствующего газа в насадку

воляло наносить покрытия из металлов, керамики и их композиций, получать градиентные покрытия с содержанием компонентов от 0 до 100 %.

Проверка внутренней поверхности насадки показала, что налипание напыляемого материала на боковой стенке не наблюдается. При этом общий расход транспортирующего газа составлял  $0,168...0,270 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что в два раза превышает его значение при напылении без насадки с одним штуцером. Расход сопутствующего газа составлял  $0,28...0,30 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Налипание части порошка на внутренней стенке насадки происходит при расходе сопутствующего газа менее  $0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при расходе транспортирующего газа менее  $0,12 \text{ м}^3/\text{ч}$  или более  $0,36 \text{ м}^3/\text{ч}$  и наблюдается в месте сужения, где цилиндрическая часть насадки переходит в коническую (рис. 5).

Можно предположить, что причиной налипания является попадание части напыляемого материала на периферию струи, где их приобретенная скорость и температура частиц достаточны для образования отложения на преграде (сужении). Это подтверждается полурасплавленным, рыхлым состоянием материала отложения. При этом покрытие, напыленное на образец, плотное, имеет мало дефектов на границе с подложкой.

Увеличение расхода сопутствующего газа более  $0,48...0,60 \text{ м}^3/\text{ч}$  ведет к «захлаживанию» струи, что увеличивает количество «холодных» частиц и снижает коэффициент использования материала.

На рис. 6 приведен вид пятна напыления без и с использованием насадки. Пятно напыления

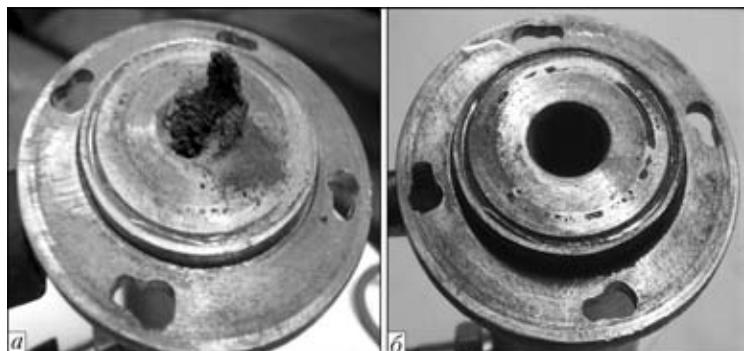


Рис. 5. Вид нижней части насадки после напыления с расходом транспортирующего газа  $0,36$  (а) и  $0,264$  (б)  $\text{м}^3/\text{ч}$

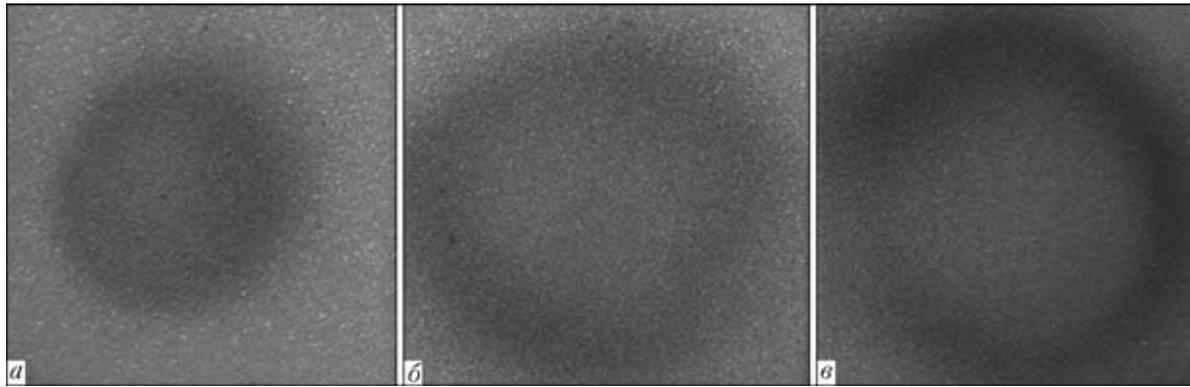


Рис. 6. Пятно напыления при нанесении покрытия с использованием насадки (а), цилиндрической части насадки (б) и без нее (в)

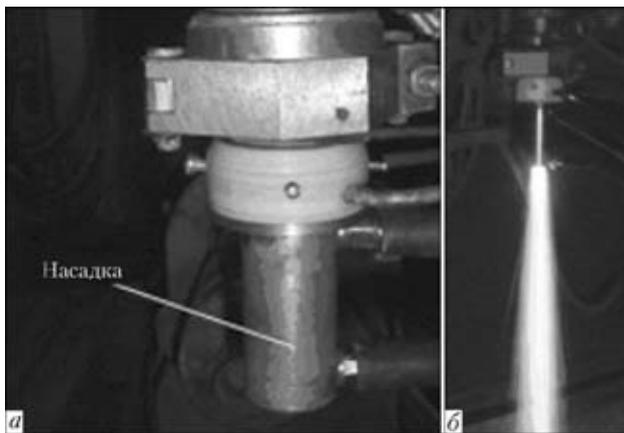


Рис. 7. Вид насадки (а) и напыляющей струи (б) при использовании порошка ПТ-НА-01

без насадки при том же материале и дистанции напыления в 1,5...2 раза больше, чем при напылении с насадкой. Это свидетельствует о снижении угла напыления при использовании насадки. Кроме разницы размеров пятна напыления, покрытия характеризуются степенью взаимодействия его материала с внешней средой.

В пятне напыления, полученном без использования защитной насадки, видны следы окисления порошка по периферии пятна. Покрытия, полученные с применением насадки, не имеют видимых мест окисления. Это подтверждает отсутствие окислительной среды внутри насадки и отсутствие подсоса воздуха.

При напылении металлического порошка, например, ПТ-НА-01 с размерами частиц 10...45 мкм, имеющих круглую форму, напыляющая струя имеет форму конуса с углом, близким углу внутренней поверхности насадки на длине более 250 мм от торца насадки (рис. 7). Конус струи при напылении покрытия из порошка оксида алюминия средней фракции 28 мкм осколочной формы сохраняет свою конфигурацию на длине 50...60 мм от среза насадки, после чего угол расширения увеличивается на 12° и более.

### Заключение

При конструировании насадок для увеличения скорости истечения струи рекомендуется внутреннюю поверхность выполнять в виде расширяющегося конуса с углом до 8°.

Угол раскрытия напыляющей струи определяется формой и размерами внутренней поверхности насадки, плотностью материала напыляемого порошка, размером и формой его частиц. При напылении металлических порошков с округлой формой частиц угол составляет 4...6° и сохраняется на длине 250 мм и более. Для керамических порошков, имеющих частицы осколочной формы, угол раскрытия увеличивается до 8°. При этом после выхода струи из насадки увеличивается угол ее раскрытия и при дистанции напыления более 120 мм он составляет 12° и более.

Для исключения подсоса окружающей среды внутрь насадки и исключения взаимодействия со струей внутренняя геометрия насадки должна приближаться к форме и размерам затопленной струи, полученной при напылении сферических порошков, рекомендуется применение сопутствующего защитного газа и создание в насадке избыточного давления. Налипание напыляемого материала на внутреннюю стенку насадки определяется соотношением расходов сопутствующего и транспортирующего газов. Для насадки с углом раскрытия около 6° расход сопутствующего газа должен составлять не менее 0,28 м<sup>3</sup>/ч.

1. Кречман Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. — М.: Машиностроение, 1966. — 432 с.
2. Хасуй А. Техника напыления. — М.: Машиностроение, 1967. — 288 с.
3. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. — М.: Наука, 1977. — 184 с.
4. Цветков Ю. В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. — М.: Наука, 1980. — 360 с.
5. Калита В. И. Физика, химия и механика формирования покрытий, упрочненных наноразмерными фазами // Физ. и химия обработки материалов. — 2005. — № 4. — С. 46–57.
6. Suzuki M., Sodeoka S., Inoue T. Study on alumina-based nanocomposite coating prepared by plasma spray // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Ohio, USA, May 5–8, 2003.

7. Коробов Ю.С., Бороненков В.Н. Кинетика взаимодействия напыляемого металла с кислородом при электродуговой металлзации // Свароч. пр-во. — 2003. — № 7. — С. 30–36.
8. Дорожкин Н. Н., Барановский В. Е., Елистратов А. П. Активированный электродуговой металлзационный процесс // Вести АН БССР. Сер. Физика и техника. — 1983. — № 3. — С. 73–78.
9. Verstak A., Baranovski V. HVAf arc spraying // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Osaka, Japan, 10–12 May, 2004.
10. Карп И. Н., Петров С. В., Рудой А. П. Электродуговая металлзация в высокоскоростном потоке продуктов сгорания метана // Автомат. сварка. — 1991. — № 1. — С. 62–65.
11. Буракин В. Совершенствование оборудования для газотермического напыления // Свароч. пр-во. — 2004. — № 5. — С. 30–35.
12. Физика и техника низкотемпературной струи / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Голдфарб, В. С. Клубникин. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
13. Анализ распределения скоростей и удельной энтальпии частиц по радиусу пятна напыления при использовании конической насадки / В. В. Кудинов, В. И. Калита, Д. Н. Комлев, О. Г. Коптева // Физ. и химия обработки материалов. — 1992. — № 5. — С. 82–85.
14. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. — М.: Мир, 1975. — 378 с.
15. Линник В. А., Пекиев П. Ю. Современная техника газотермического нанесения покрытий. — М.: Машиностроение, 1985. — 127 с.
16. Кудинов В. В., Косолапов А. Н., Пекиев П. Ю. Насадки для создания местной защиты при плазменном напылении // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1967. — 21, вып. 6. — С. 69–75.
17. Оптимизация параметров и условий применения газодинамических насадок при газотермическом напылении / Ю. С. Борисов, В. Н. Коржик, А. В. Чернышов, А. П. Мурашов // Автомат. сварка. — 1991. — № 8. — С. 67–70.
18. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1974. — 479 с.
19. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. — 824 с.
20. Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления / Ю. С. Борисов, И. В. Кривцун, А. Ф. Музыченко и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. — С. 42–51.

Application of special tips at thermal spraying reduces the number of uncontrolled factors, influencing the process, increases the speed of jet outflowing, lowers the degree of its interaction with the ambient atmosphere, and reduces the opening angle. The paper gives recommendations for designing the tips, and shows their effectiveness at coating deposition.

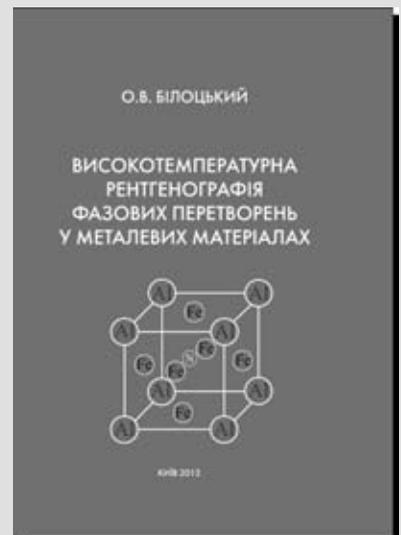
Поступила в редакцию 07.05.2012

## НОВАЯ КНИГА

**О. В. Білоцький. Високотемпературна рентгенографія фазових перетворень у металевих матеріалах.** — К.: Міжнародна асоціація «Зварювання», 2012. — 222 с. — Укр. яз.

В монографії на основі системних досліджень ізложено вперше розробані методическі основи і результати особеностей кінетики фазових превращень в лучах високотемпературної рентгенографії металіческіх матеріалів. Кінематографіческіє зйомки осущесвлені на оригінальних конструкціях рентгеновського обладнання. Это обеспечило возможность регистрации полиморфных превращений, диффузионных процессов и изучения температурно-временных условий последовательности образования и распада твердых растворов и химических соединений. Показана доминирующая роль и значение изменений химического состава и физического состояния фазовых составляющих сплавов во время термической и химико-термической обработки как средства управления их структурой и свойствами.

Для научно-технических работников, разрабатывающих новые материалы и изучающих их строение и свойства, а также преподавателей, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.



По вопросам реализации просьба обращаться  
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»