

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.47.08

УДК 621.793

**С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, А.С. Желнина**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

## **НАНЕСЕНИЕ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ (МЕТАЛЛ – МЕТАЛЛ) ПОКРЫТИЙ**

Представлены результаты исследования формирования композиционных покрытий из многокомпонентных смесей, в частности из двухкомпонентных, представляющих собой смеси двух разных металлических порошков. Методом холодного газодинамического напыления получены образцы с композитными покрытиями из смесей порошков алюминия и меди при разной исходной массовой концентрации алюминия (от 0 до 100 вес. % с шагом 10 вес. %) при прочих равных условиях (давление торможения воздуха 1,5 МПа, температура торможения 500 К). Измерены коэффициент напыления смеси и остаточное содержание компонентов в полученных композитных покрытиях. Данные по остаточному содержанию компонентов в покрытии позволяют выбрать состав исходного порошка, необходимый для получения заданного содержания компонентов в покрытии. Найдены зависимости коэффициентов напыления меди и алюминия от массового содержания алюминия в напыляемой смеси. При исходной концентрации алюминия менее ~ 65 вес. % коэффициент напыления меди оказывается выше коэффициента напыления алюминия. Оба монотонно увеличиваются с ростом концентрации алюминия, пока она не достигнет величины ~ 60 вес. %. При высоких концентрациях алюминия (более ~ 65 вес. %) коэффициенты напыления меди, алюминия и их смеси совпадают. Полученные результаты подтверждают наличие взаимовлияния компонентов друг на друга и обосновывают метод введения добавочного компонента для получения композиционного покрытия, содержащего «труднонапыляемый» компонент.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, эрозионно-адгезионный переход, композиционные покрытия, смесь порошков, коэффициент напыления, остаточное содержание компонентов в покрытии.

**S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, A.S. Zhelnina**

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

## **COLD SPRAYING OF COMPOSITE (METAL + METAL) COATINGS**

The paper presents results of study of composite coating formation using multicomponent mixtures, in particular two-component that is mixture between two different metal powders. Samples with composite coatings were cold sprayed using mixtures of aluminum and copper powders at different initial aluminum mass concentration (from 0 to 100 wt.% in increments of 10 wt.%) under other equal conditions (air stagnation pressure 1,5 MPa, stagnation temperature 500 K). Mixture deposition efficiencies and residual contents of components in obtained composite coatings were measured. The data

obtained on residual content of components in coatings allow choosing component contents in initial powder required for production of given component content in coating. Dependences of copper and aluminum deposition efficiencies upon aluminum mass concentration in sprayed mixture are found. At initial aluminum concentration less than ~ 65 wt.% copper deposition efficiency is higher than aluminum deposition efficiency. Both copper and aluminum deposition efficiencies increase monotonically with increase in aluminum concentration until it reaches value of ~ 60 wt.%. At higher concentrations of aluminum (over ~ 65 wt.%) deposition efficiencies of copper, aluminum and their mixtures coincide. These results confirm presence of interference between components and justify method for production of composite coating, comprising not easy-deposited component, due to introducing additional easy-deposited component.

**Keywords:** cold spraying, erosion-adhesion transition, composite coatings, powder mixture, deposition efficiency, residual content of componets in coating.

## Введение

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) – быстроразвивающийся метод порошкового нанесения покрытий [1], в котором частицы с характерным размером 10–150 мкм ускоряются в сверхзвуковом потоке газа до скоростей 400–1200 м/с и при ударе о подложку закрепляются на ней без фазовых переходов. Явление открыто и исследовано в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Отсутствие высоких температур позволяет существенно расширить возможности методов нанесения покрытий порошковыми материалами и обеспечивает ряд важных преимуществ метода ХГН перед известными газотермическими методами, включая:

- возможность использования для напыления порошков с размером менее 30–50 мкм, в том числе ультрадисперсных, что приводит к улучшению качества покрытия – увеличивается его плотность, уменьшается объем микропустот, структура становится более однородной, появляется возможность уменьшить толщину покрытия;

- отсутствие существенного нагрева частиц и связанных с ним процессов высокотемпературного окисления, фазовых переходов и т.д., что позволяет получать покрытия со свойствами, близкими к свойствам материала исходных частиц, а также композиционные покрытия из механической смеси порошков, значительно различающихся по физико-термическим свойствам;

- отсутствие существенного термического воздействия на изделие, что позволяет наносить покрытия на подложки из нетермостойких материалов;

- простота технической реализации и улучшение безопасности работ в связи с отсутствием высокотемпературных струй, а также огне- и взрывоопасных газов.

На основе метода ХГН создаются технологии для решения задач энерго- и ресурсосбережения в различных областях промышленности и вводятся в практику нетрадиционные и эффективные способы производства, ремонта, восстановления, антикоррозионной защиты, получения электро- и теплопроводящих, антифрикционных и других покрытий функциональных узлов и элементов самой различной техники и оборудования. Группа ученых под руководством академика В.М. Фомина за создание обобщенной теории взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с преградой, разработку технологий и оборудования для газодинамического напыления металлов, широко-масштабно используемых в мировой практике, удостоена премии Правительства РФ в области науки и техники (2010 г.).

Возможность образования покрытий из частиц в твердом (нерасплавленном) состоянии оказалась неожиданной для специалистов, поскольку существовали представления о необходимости плавления (общего либо локального) для появления адгезии между частицей и поверхностью подложки и образования покрытия и о том, что при ударе нерасплавленной частицы упругая энергия вызовет отскок частицы от преграды. Начиная примерно с 2000 г. по всему миру стали появляться центры и лаборатории по изучению возможностей метода ХГН. Интенсивность исследований наглядно демонстрируется большим числом публикаций, развернутый обзор литературы представлен в монографиях [2] (первая в мире монография, посвященная изложению основ ХГН), [3, 4]. В результате проведенных исследований были предложены различные технические решения за счет оптимального выбора рабочего газа [5], размера и формы частиц порошка [6], стратегии напыления (число проходов, скорость сканирования) [7], угла напыления [8], подогрева порошка [9], оптимальной геометрии масок, подслоев [10]. Следует отметить также работы по напылению в вакууме субмикронных порошков [11], применению микросопел (до 50 мкм в диаметре) для напыления нанопорошков (включая неметаллы) [12], по металлизации методом ХГН стекла и кремния [13], разных пластиков [14–18], а также напыления порошков пластиков [19, 20]. Все эти достижения показывают, насколько широка область применения ХГН. Большое разнообразие получаемых с его помощью материалов и покрытий подробно представлено в недавно вышедших (2014–2016 гг.) в международной печати обзорах [21–25].

Однако потенциал ХГН до конца не раскрыт, некоторые аспекты процесса требуют дальнейшего исследования с целью создания новых технологий, их оптимизации, а также более глубокого понимания физики высокоскоростного ударного взаимодействия гетерогенных потоков с преградами.

Одной из таких задач является изучение формирования композиционных покрытий из многокомпонентных смесей, в частности из двухкомпонентных, представляющих собой смеси двух различных металлических порошков. Особенно важно выявить взаимное влияние компонентов, например, когда коэффициент напыления одного из компонентов в присутствии другого компонента отличается от коэффициента напыления при отсутствии другого компонента. Для изучения этого явления была выбрана в качестве примера смесь порошков алюминия и меди. Ранние эксперименты показали, что при температуре 500 К коэффициент напыления медного порошка практически равен нулю. В то же время коэффициент напыления алюминиевого порошка при этой температуре заметно отличается от нуля (ниже в работе приведены конкретные значения). Новизна данного исследования заключается в том, чтобы показать, что при этой же температуре рабочего воздуха (500 К) можно увеличить коэффициент напыления меди путем создания смеси с добавлением алюминия. Это позволит обосновать, что в тех случаях, когда не удается из какого-нибудь порошка получить покрытие в силу ограниченных возможностей конкретной установки ХГН, добавление подходящего компонента, который сравнительно легко формирует покрытие, позволит получить композиционное покрытие, в состав которого в определенной пропорции будет входить и «труднонапыляемый» компонент.

Целью работы являлось доказательство взаимовлияния компонентов друг на друга при ХГН и обоснование методики введения добавочного компонента для получения композиционного покрытия. В частности, в условиях, когда коэффициент напыления меди почти равен нулю (при температуре рабочего воздуха 500 К), это поиск экспериментальной зависимости изменения коэффициента напыления от процентного содержания порошков меди и алюминия в напыляемой смеси, определение их остаточного содержания в покрытии и затем вычисление на основе этих данных коэффициентов напыления меди и алюминия.

## Материалы, оборудование и методики

### Используемые порошки

Для получения композиционных покрытий использовалась механическая смесь порошка алюминия АСД-1 и меди ПМС-1. На рис. 1 показаны микрофотографии частиц этих порошков.

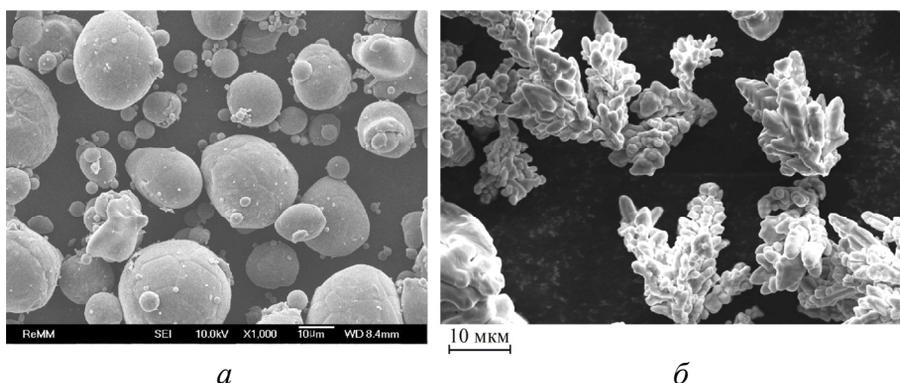


Рис. 1. Напыляемые порошки: *a* – порошок алюминия АСД-1; *б* – порошок меди ПМС-1

Распределение частиц порошка по размеру является одним из важнейших параметров, определяющих возможность его применения в ХГН и качество получаемых покрытий [1]. Анализ распределения частиц по размерам проводился на лазерном анализаторе размера частиц LS 13320 (Beckman Coulter, США). Объемные функции распределения частиц по размерам показаны на рис. 2.

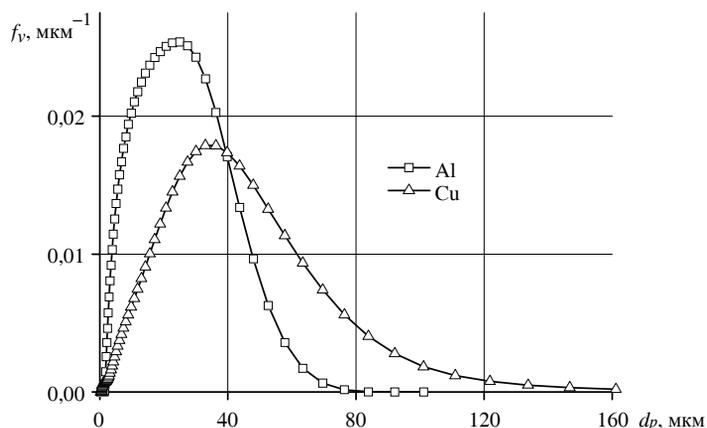


Рис. 2. Объемные функции распределения частиц по размерам

Средние значения размеров частиц  $d_{p,m}$  и стандартное отклонение  $s_d$ , вычисленные по измеренному объемному распределению, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средний диаметр и стандартное отклонение распределения частиц по размерам

Порошок	$d_{p,m}$ , мкм	$s_d$ , мкм
АСД-1	30,2	15,7
ПМС-1	46,3	26,5

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что максимальную долю по объему (массе) занимают частицы размером 20–50 мкм для алюминия и 40–80 мкм для меди.

Для анализа элементного состава покрытия (нахождения содержания компонентов в покрытии) применялся рентгеноспектральный микроанализ, который осуществляется энергодисперсионным безазотным спектрометром INCA Energy 350 x-MAX (Oxford Instruments, США) сканирующего электронного микроскопа EVO MA15 (Karl Zeiss, Германия).

Массовые доли порошков меди и алюминия в напыляемых смесях представлены в табл. 2.

Таблица 2

Массовые доли порошков в смесях

Порошок	Номер смеси										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$c_{Cu}$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	–
$c_{Al}$	–	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

### **Оборудование для напыления**

Напыление на стальные подложки проводилось с помощью установки ХГН (являющейся уникальным оборудованием), размещенной в специализированной шумозащитной камере напыления (рис. 3) и оснащенной роботизированной шестикоординатной системой позиционирования KR-16 (KUKA Robotics, Германия), на которой были

смонтированы сопло и нагреватель (рис. 4). Использование робота (управляемого компьютером) позволило с высокой точностью позиционировать (0,1 мм) и перемещать (0,1 мм/с) сопло относительно подложки.



Рис. 3. Пыле- и шумозащитный бокс

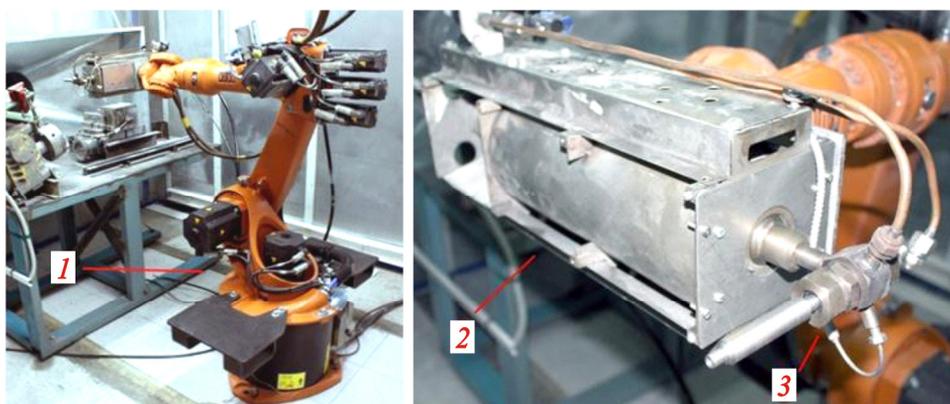


Рис. 4. Промышленный робот KUKA KR 16-2 с узлом ХГН:  
1 – робот; 2 – нагреватель; 3 – сопловой узел

Для напыления использовался эжекторный сопловой узел с диаметром выходного сечения 5 мм и длиной сверхзвуковой части 80 мм, изготовленный из нержавеющей стали 12Х18Н10Т [26]. Схема такого соплового узла, предназначенного для формирования сверхзвуковых гетерогенных потоков в условиях ХГН, представлена на рис. 5.

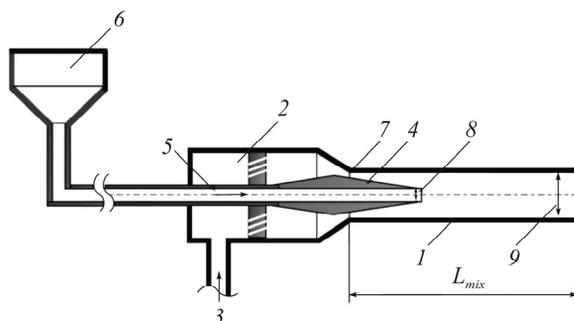


Рис. 5. Схема реализации ХГН с помощью эжекторного сопла: 1 – сопло; 2 – форкамера; 3 – подача газа; 4 – центральное тело; 5 – подача порошка; 6 – дозатор; 7 – критическое сечение сопла; 8 – ввод частиц; 9 – выходное сечение сопла

Достоинство эжекторных сопел заключается в сбалансированном подсосе необходимого количества газа из среды с атмосферным давлением. Кроме этого конструкция этих сопел позволяет проводить настройку на различные режимы работы (различные числа Маха, давления, степень подсоса), соответственно, различные скорости частиц. Давление торможения в форкамере  $p_0 = 1,6$  МПа, давление эжекции  $p_{ej} = 0,095$  МПа, температура торможения в форкамере  $T_0 = 500$  К.

Оборудование (пульт управления установки ХГН) поддерживало необходимые параметры эксперимента (давление торможения и температуру торможения воздуха) с высокой точностью (1 К по температуре и 0,01 МПа по давлению), что позволяло обеспечить хорошую повторяемость условий эксперимента.

### ***Методика измерения коэффициента напыления***

Коэффициент напыления смеси определялся как отношение массы полученного покрытия к массе израсходованного порошка (в экспе-

риментах она составляла примерно 5 г). По разности масс подложки до и после напыления определялась масса полученного покрытия (точность взвешивания  $10^{-5}$  г). Коэффициенты напыления отдельно меди и алюминия в напыленной смеси вычислялись по измеренному коэффициенту напыления смеси и результатам элементного анализа образцов на электронном микроскопе.

### Результаты

Проводя напыление смесями, перечисленными в табл. 2, при одинаковых параметрах напыления получили образцы подложек с покрытиями для дальнейших исследований. На рис. 6, в качестве примера, показана микрофотография шлифа подложки с композиционным покрытием медь – алюминий.

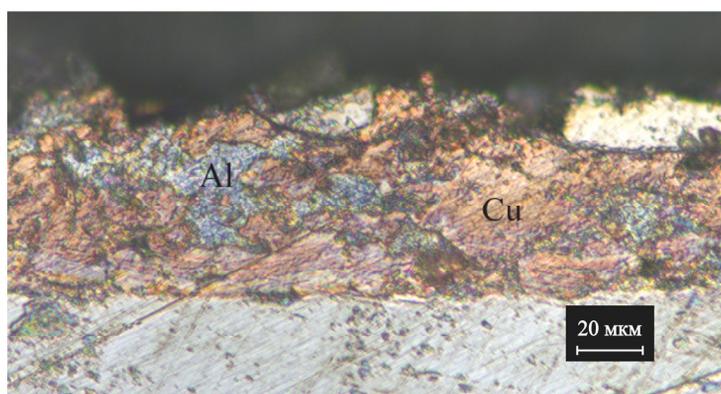
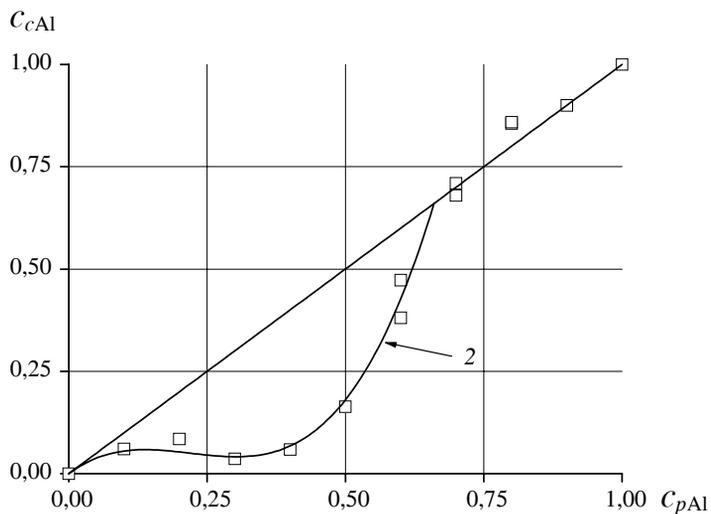
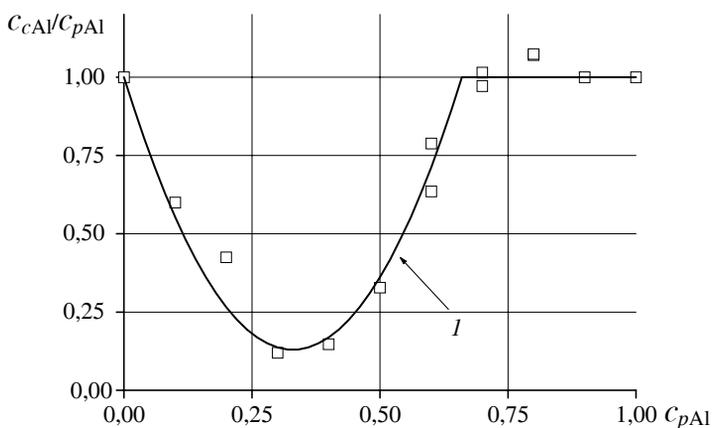


Рис. 6. Микрофотография шлифа подложки с композиционным покрытием медь – алюминий

На рис. 7, а представлены данные по массовому содержанию алюминия в покрытии (далее обозначено как  $c_{cAl}$ ) в зависимости от массового его содержания в исходном порошке (далее обозначено как  $c_{pAl}$ ). На рис. 7, б данные представлены в виде отношения  $c_{cAl}/c_{pAl}$ , чтобы наглядно показать, что они могут быть аппроксимированы параболой и участком постоянной величины, равной 1.



*a*



*б*

Рис. 7. Массовое содержание алюминия в покрытии в зависимости от его массового содержания в исходном порошке: *a* – абсолютные значения; *б* – отношение к массовому содержанию в порошке

Кривая *1* описывается по формуле

$$\frac{C_{cAl}}{C_{pAl}} = \left( \frac{C_{cAl}}{C_{pAl}} \right)_{\min} + \left[ 1 - \left( \frac{C_{cAl}}{C_{pAl}} \right)_{\min} \right] \left( \frac{C_{cAl}}{C_{pAl}^{\min}} - 1 \right)^2,$$

где  $\left(\frac{c_{cAl}}{c_{pAl}}\right)_{\min}$  – минимальное значение отношения  $\frac{c_{cAl}}{c_{pAl}}$ ;  $c_{pAl}^{\min}$  – содержание Al в исходном порошке, соответствующее  $\left(\frac{c_{cAl}}{c_{pAl}}\right)_{\min}$ .

Соответственно, аппроксимация для  $c_{cAl}$  может быть записана в следующем виде (кривая 2):

$$c_{cAl} = c_{pAl} \left\{ \left(\frac{c_{cAl}}{c_{pAl}}\right)_{\min} + \left[ 1 - \left(\frac{c_{cAl}}{c_{pAl}}\right)_{\min} \right] \left( \frac{c_{cAl}}{c_{pAl}^{\min}} - 1 \right)^2 \right\}.$$

На рис. 8 показано массовое содержание меди в покрытии, полученное пересчетом данных, приведенных на рис. 6, по формуле

$$c_{cCu} = 1 - c_{cAl}.$$

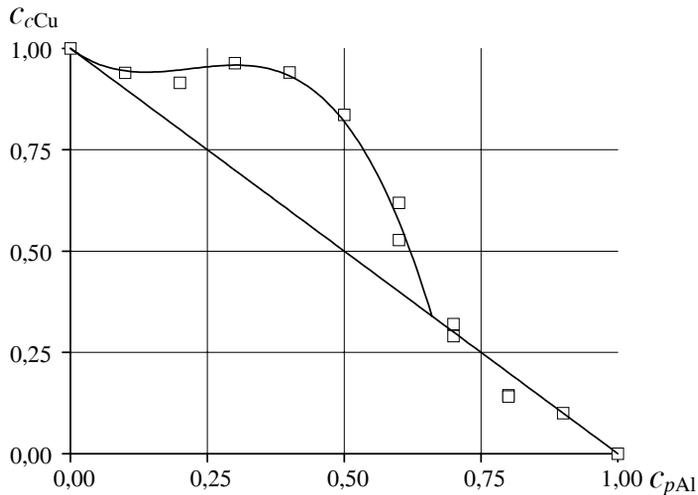


Рис. 8. Массовое содержание меди в покрытии в зависимости от массового содержания алюминия в исходном порошке

На рис. 9 показаны зависимости коэффициентов напыления смеси алюминия и меди 1, только алюминия 2 и только меди 3 от массового содержания алюминия в исходной смеси. Коэффициенты напыления определены по содержанию алюминия в покрытии по формулам

$$k_{dAl} = \frac{c_{cAl}}{c_{pAl}} k_{dmix}, \quad k_{dCu} = \frac{1 - c_{cAl}}{1 - c_{pAl}} k_{dmix}.$$

Здесь  $k_{dmix}$ ,  $k_{dAl}$ ,  $k_{dCu}$  – коэффициенты напыления смеси порошков алюминия и меди, только порошка алюминия и только порошка меди.

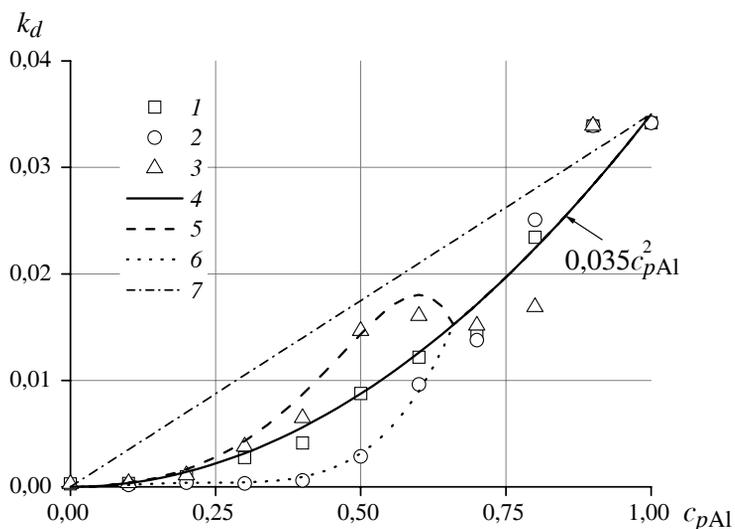


Рис. 9. Зависимости массовых коэффициентов напыления смеси 1, алюминия 2, меди 3 от массовой концентрации алюминия в исходной смеси; 4 – параболическая аппроксимация коэффициента напыления смеси; 5 – аппроксимация коэффициента напыления меди; 6 – аппроксимация коэффициента напыления алюминия; 7 – коэффициент напыления смеси по линейной теории (когда компоненты не влияют друг на друга)

Данные для коэффициента напыления смеси хорошо аппроксимируются параболой 4 (см. рис. 9). Штриховой кривой 5 показана зависимость коэффициента напыления меди, вычисленная по аппроксимирующим кривым, пунктирной 6 – коэффициента напыления алюминия.

Видно, что при исходной концентрации алюминия менее ~ 65 вес. % коэффициент напыления меди оказывается выше коэффициента напыления алюминия. Оба монотонно увеличиваются с ростом концентрации алюминия, пока она не достигнет величины ~ 60 вес. %. При высоких концентрациях алюминия (более ~ 65 вес. %) коэффициенты напыления меди и алюминия совпадают друг с другом и с коэффициентом напыления смеси.

Согласно линейной теории, если порошки не влияют друг на друга, то их коэффициенты напыления остаются одинаковыми независимо от того, в какой пропорции они смешаны. Это позволяет вычислить коэффициент напыления смеси на основании всего двух измерений: коэффициента напыления только первого компонента (меди при отсутствии алюминия)  $k_{dCu_0}$  и только второго компонента (алюминия при отсутствии меди)  $k_{dAl_0}$ . Далее по формуле

$$k_{dmix_0} = ck_{dAl_0} + (1-c)k_{dCu_0}$$

можно найти коэффициент напыления смеси при заданном исходном содержании алюминия. Вычисленные по этой формуле величины показаны на рис. 9 штрих-пунктирной линией 7. Видно, что в данном случае предположение, что компоненты не влияют друг на друга, необоснованно, поскольку наблюдаются существенные различия между расчетом по линейной теории и экспериментальными результатами.

Полученные данные по остаточному содержанию компонентов в покрытии (см. рис. 7 и 8) позволяют выбрать состав исходного порошка, необходимый для получения заданного содержания компонентов в покрытии. Например, максимальное остаточное содержание меди (~ 95 вес. %) может быть получено при добавлении в исходный порошок 30–40 вес. % алюминия. При такой исходной концентрации алюминия коэффициент напыления меди составит ~0,5 % (см. рис. 9), что все-таки заметно выше, чем коэффициент напыления чистой меди (0,01 %). Если, например, требуется получить остаточное содержание меди ~ 50 вес. %, то необходимо добавить в исходный порошок ~ 60 вес. % алюминия (см. рис. 8). В этом случае коэффициент напыления меди заметно вырастет и будет уже ~ 15 % (см. рис. 9) и т.д.

Из данного исследования можно сделать вывод, что в процессе напыления компоненты смеси влияют друг на друга. Предположительно механизм взаимодействия компонентов заключается в том, что компоненты с разной вероятностью закрепляются на поверхности, состоящей из разных материалов (т.е. вероятность закрепления медных частиц на поверхности из алюминиевых частиц выше, чем вероятность закрепления медных частиц на поверхности из стали или самих медных частиц).

## Заключение

Методом ХГН получены образцы с композитными покрытиями из смесей порошков алюминия и меди при разной исходной массовой концентрации алюминия (от 0 до 100 вес. % с шагом 10 вес. %) при прочих равных условиях (давление торможения воздуха 1,5 МПа, температура торможения 500 К).

Измерены коэффициент напыления смеси и остаточное содержание компонентов в полученных композитных покрытиях. Данные по остаточному содержанию компонентов в покрытии позволяют выбрать состав исходного порошка, необходимый для получения заданного содержания компонентов в покрытии.

Найдены зависимости коэффициентов напыления меди и алюминия от массового содержания алюминия в напыляемой смеси. При исходной концентрации алюминия менее ~ 65 вес. % коэффициент напыления меди оказывается выше коэффициента напыления алюминия. Оба монотонно увеличиваются с ростом концентрации алюминия, пока она не достигнет величины ~ 60 вес. %. При высоких концентрациях алюминия (более ~ 65 вес. %) коэффициенты напыления меди, алюминия и их смеси совпадают.

Полученные результаты подтверждают наличие взаимовлияния компонентов друг на друга и обосновывают метод введения добавочного компонента для получения композиционного покрытия, содержащего «труднонапыляемый» компонент.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-08-04129-а.*

## Библиографический список

1. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев [и др.]. – М.: Физматлит, 2010. – 533 с.
2. Cold spray technology / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov [et al.]. – Elsevier Science, 2007. – 336 p.
3. The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications. – Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007. – 362 p.
4. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray: Physics & Technology. – Weinheim: Wiley-VCH, 2008. – 234 p.

5. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings / W. Wong, E. Irissou, A.N. Ryabinin [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 213–226.

6. Effect of particle morphology and size distribution on cold-sprayed pure titanium coatings / W. Wong, P. Vo, E. Irissou, A.N. Ryabinin [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2013. – Vol. 22. – P. 1140–1153.

7. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment / A. Sova, S. Grigoriev, A. Okunkova [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 2013. – Vol. 235. – P. 283–289.

8. Influence of impact angle and gas temperature on mechanical properties of titanium cols spray deposits / K. Binder, J. Gottschalk, M. Kollenda [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 234–242.

9. Manufacturing and macroscopic properties of cold sprayed Cu-In coating material for sputtering target / Y.-M. Jin, J.-H. Cho, D.-Y. Park [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 497–507.

10. Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat / Y. Li, Ch.-J. Li, Q. Zhang [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2010. – Vol. 19. – P. 168–177.

11. Effect of process gas flow on the coating microstructure and mechanical properties of vacuum kinetic-sprayed TiN layers / F. Cao, H. Park, J. Heo [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2013. – Vol. 22. – P. 1109–1119.

12. Deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders using nano-particle deposition system / W. Song, K. Jung, D.-M. Chun [et al.] // Surface Review and Letters. – 2010. – Vol. 17. – P. 189–193.

13. Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates / D.-Y. Kim, J.-J. Park, J.-G. Lee [et al.] // J. of Therm. Spray Technol. – 2013. – Vol. 22. – P. 1092–1102.

14. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process / F. Robitaille, M. Yandouzi, S. Hind [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 2009. – Vol. 203. – P. 2954–2960.

15. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray / X.I. Zhou, A.F. Chen, J.C. Liu [et al.] // *Surf. and Coat. Technol.* – 2011. – Vol. 206. – P. 132–136.

16. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray // *Surf. and Coat. Technol.* – 2010. – Vol. 205. – P. 2167–2173.

17. Lupoi R., O'Neill W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles // *Surf. and Coat. Technol.* – 2011. – Vol. 206. – P. 1069–1076.

18. Cold gas spray titanium coatings onto biocompatible polymer / M. Gardon, A. Latorre, M. Torrell [et al.] // *Material Letters.* – 2013. – Vol. 106. – P. 97–99.

19. Alhulaifi A.S., Buck G.A., Arbegast W.J. Numerical and experimental investigation of cold spray gas dynamic effects for polymer coating // *J. of Therm. Spray Technol.* – 2012. – Vol. 21. – P. 852–862.

20. Xu Y., Hutchings I.M. Cold spray deposition of thermoplastic powder // *Surf. and Coat. Technol.* – 2006. – Vol. 201. – P. 3044–3050.

21. Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications / S. Grigoriev, A. Okunkova, A. Sova [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* – 2015. – Vol. 268. – P. 77–84.

22. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives / A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano [et al.] // *Surf. Eng.* – 2014. – Vol. 36, № 6. – P. 369–395.

23. Champagne V.K., Helfrich D.J. Mainstreaming cold spray – push for applications // *Surf. Eng.* – 2014. – Vol. 30, № 6. – P. 396–403.

24. Hassani-Gangaraj S.M., Moridi A., Guagliano M. Critical review of corrosion protection by cold spray coatings // *Surf. Eng.* – 2015. – Vol. 31, № 11. – P. 803–815.

25. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator / C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir [et al.] // *J. Therm. Spray Technol.* – 2016. – Vol. 25(1–2). – P. 193–201.

26. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Сова А.А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях холодного газодинамического напыления // *Теплофизика и аэромеханика.* – 2006. – Т. 13, № 3. – С. 386–397.

## References

1. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F. [et al.]. Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriya i praktika [Cold gasdynamic spraying. Theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 533 p.
2. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S. [et al.]. Cold spray technology. Elsevier Science. 2007. 336 p.
3. The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007. 362 p.
4. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray: Physics & Technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 234 p.
5. Wong W., Irissou E., Ryabinin A.N. [et al.]. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2011, vol. 20, pp. 213-226.
6. Wong W., Vo P., Irissou E., Ryabinin A.N. [et al.]. Effect of particle morphology and size distribution on cold-sprayed pure titanium coatings. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2013, vol. 22, pp. 1140-1153.
7. Sova A., Grigoriev S., Okunkova A. [et al.]. Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment. *Surf. and Coat. Technol.*, 2013, vol. 235, pp. 283-289.
8. Binder K., Gottschalk J., Kollenda M. [et al.]. Influence of impact angle and gas temperature on mechanical properties of titanium cold spray deposits. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2011, vol. 20, pp. 234-242.
9. Jin Y.-M., Cho J.-H., Park D.-Y. [et al.]. Manufacturing and macroscopic properties of cold sprayed Cu-In coating material for sputtering target. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2011, vol. 20, pp. 497-507.
10. Li Y., Li Ch.-J., Zhang Q. [et al.]. Influence of TGO composition on the thermal shock lifetime of thermal barrier coatings with cold-sprayed MCrAlY bond coat. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2010, vol. 19, pp. 168-177.
11. Cao F., Park H., Heo J. [et al.]. Effect of process gas flow on the coating microstructure and mechanical properties of vacuum kinetic-sprayed TiN layers. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2013, vol. 22, pp. 1109-1119.
12. Song W., Jung K., Chun D.-M. [et al.]. Deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders using nano-particle deposition system. *Surface Review and Letters.*, 2010, vol. 17, pp. 189-193.
13. Kim D.-Y., Park J.-J., Lee J.-G. [et al.]. Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2013, vol. 22, pp. 1092-1102.

14. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S. [et al.]. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. *Surf. and Coat. Technol.*, 2009, vol. 203, pp. 2954-2960.

15. Zhou X.I., Chen A.F., Liu J.C. [et al.]. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray. *Surf. and Coat. Technol.*, 2011, vol. 206, pp. 132-136.

16. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray. *Surf. and Coat. Technol.*, 2010, vol. 205, pp. 2167-2173.

17. Lupoi R., O'Neill W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles. *Surf. and Coat. Technol.*, 2011, vol. 206, pp. 1069-1076.

18. Gardon M., Latorre A., Torrell M. [et al.]. Cold gas spray titanium coatings onto biocompatible polymer. *Material Letters*, 2013, vol. 106, pp. 97-99.

19. Alhulaifi A.S., Buck G.A., Arbogast W.J. Numerical and experimental investigation of cold spray gas dynamic effects for polymer coating. *J. of Therm. Spray Technol.*, 2012, vol. 21, pp. 852-862.

20. Xu Y., Hutchings I.M. Cold spray deposition of thermoplastic powder. *Surf. and Coat. Technol.*, 2006, vol. 201, pp. 3044-3050.

21. Grigoriev S., Okunkova A., Sova A. [et al.]. Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications. *Surf. Coat. Technol.*, 2015, vol. 268, pp. 77-84.

22. Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M. [et al.]. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. *Surf. Eng.*, 2014, vol. 36, no. 6, pp. 369-395.

23. Champagne V.K., Helfrich D.J. Mainstreaming cold spray – push for applications. *Surf. Eng.*, 2014, vol. 30, no. 6, pp. 396-403.

24. Hassani-Gangaraj S.M., Moridi A., Guagliano M. Critical review of corrosion protection by cold spray coatings. *Surf. Eng.*, 2015, vol. 31, no. 11, pp. 803-815.

25. Widener C.A., Carter M.J., Ozdemir O.C. [et al.]. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator. *J. Therm. Spray Technol.*, 2016, vol. 25(1-2), pp. 193-201.

26. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Sova A.A. Investigation of an ejector scheme for forming heterogeneous supersonic flows under cold gas-dynamic spraying conditions. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 3, pp. 359-368.

### Об авторах

**Клинков Сергей Владимирович** (Новосибирск, Россия) – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, e-mail: klyiii@yandex.ru).

**Косарев Владимир Федорович** (Новосибирск, Россия) – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, e-mail: vkos@itam.nsc.ru).

**Желнина Анастасия Сергеевна** (Новосибирск, Россия) – лаборант Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, e-mail: zhelnina.anastasiya93@gmail.com).

### About the authors

**Sergei V. Klinkov** (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member, Leading Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (4/1, Institutskya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: klyiii@yandex.ru).

**Vladimir F. Kosarev** (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of a Laboratory, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (4/1, Institutskya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: vkos@itam.nsc.ru).

**Anastasiya S. Zhelnina** (Novosibirsk, Russian Federation) – Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (4/1, Institutskya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: zhelnina.anastasiya93@gmail.com).

Получено 21.09.2016