

УДК. 621.793.7

DOI:10.30977/BUL.2219-5548.2018.81.0.62

## ХОЛОДНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЛАСТИКИ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Шоринов А.В., Волков А.О., Маркович С.Е.,  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

*Аннотация.* Проведен анализ современного состояния вопроса в области холодного газодинамического напыления (ХГН) металлических покрытий на композиционные материалы (КМ), который показал, что ХГН является перспективным методом формирования покрытий на неметаллах.

*Ключевые слова:* холодное газодинамическое напыление, композиционные материалы, покрытия, свойства покрытий.

### Введение

Явление формирования покрытия ХГН впервые было обнаружено в Институте теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН) в начале 80-х годов прошлого века при изучении обтекания затупленных тел сверхзвуковых двухфазным потоком (газ + твердые частицы) [1]. И продолжает исследоваться и развиваться как перспективная аддитивная технология во многих отраслях промышленности.

### Анализ публикаций

Интерес к технологии ХГН за последние годы значительно вырос, о чем свидетельствует большое количество публикаций. Большинство работ посвящены вопросам газодинамики сверхзвукового потока в сужающемся-расширяющемся сопле [2–6], изучению характеристик покрытий [7–10], а также механизму формирования покрытия при соударении частиц с подложкой [11]. Исследования были в основном посвящены напылению металлических и композиционных (металл + керамика) покрытий на металлические поверхности.

Однако информации о механизме образования металлических покрытий на неметаллических подложках и изучении свойств таких покрытий представлено недостаточно, что обуславливает актуальность проведения данного анализа с последующим использованием накопленного опыта для проведения дальнейших исследований в данной области.

### Цель и постановка задачи

Таким образом, целью данной работы является анализ современного состояния вопроса в области формирования металлических покрытий на неметаллических поверхностях холодным газодинамическим напылением.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- обзор применения неметаллических материалов в промышленности;
- анализ возможностей применения технологии ХГН с неметаллическими материалами.

### Применение композиционных материалов и пластиков в промышленности

В настоящее время композиционные материалы (КМ) на основе сверхтонких углеродных, стеклянных, органических и других типов волокон в сочетании с полимерными связующими материалами достаточно широко применяются в различных отраслях техники. Наиболее перспективной областью их применения является авиационная и ракетно-космическая техника, где востребованы такие свойства композитов, как высокая удельная прочность и жесткость, а также ряд других уникальных свойств, позволяющих реализовать в конструкции особые качества. К таким свойствам следует в первую очередь отнести свойства, связанные с неметаллической природой композитов, такие как радиопрозрачность, немагнитность, а также диэлектрические свойства некоторых КМ, в частности, стеклопластиков [12].

Однако вместе с превосходными свойствами КМ и пластиков существуют и недо-

статки, ограничивающие применение данных материалов в промышленности. Среди них можно выделить: низкую эрозионную стойкость, электропроводность и невысокие рабочие температуры. Для устранения вышеперечисленных недостатков применяют металлические покрытия, что позволяет обеспечить заданные свойства поверхностей и расширить области применения неметаллических материалов.

В настоящее время для металлизации пластиков и КМ с полимерной матрицей используют всего несколько методов, а именно: физическое и химическое осаждение из паровой фазы, гальванизацию, гальванопластику и газотермическое напыление. Но данные методы имеют недостатки: высокая стоимость оборудования и процесса металлизации, ограничение по размеру образцов и площади металлизации, низкая адгезионная прочность покрытий, загрязнение окружающей среды и угроза здоровью персонала и т.д.

Положительные результаты по формированию покрытий были получены посредством газотермического напыления, при котором исходный материал полностью плавится. В качестве примера, Voueg и др. [13] успешно получили алюминиевое покрытие на тканевых материалах посредством пламенного напыления. Несмотря на высокую внутреннюю пористость, была достигнута проводимость полученного покрытия. Однако для этого необходимо было включить в систему охлаждающее устройство для защиты материала ткани от высокотемпературного воздействия расплавленного напыляемого металла. Напыление без системы охлаждения возможно только при дистанции напыления более 250 мм, что приводит к получению низкой эффективности напыления.

#### **Холодное газодинамическое напыление покрытий на КМ и пластики**

Возрастающий спрос на низкоэнергетические, экологически безопасные, эффективные и недорогие процессы нанесения покрытий стимулируют поиск и разработку новых альтернативных методов, одним из которых является холодное газодинамическое напыление (ХГН). ХГН является уникальным методом газотермического напыления, в котором порошковые материалы напыляются в твердом состоянии. Частицы порошка ускоряются в потоке нагретого и сжатого газа через сопло Лавала до сверхзвуковых скоростей и соударяются с подложкой. Способность образования покрытий зависит от ско-

рости частиц порошка. Каждый используемый материал покрытия может быть определен критической скоростью  $V_{cr}$ , при которой частицы достаточно пластически деформируются для адгезии с подложкой и образования покрытия. Ниже  $V_{cr}$  происходит эрозии поверхности подложки и отскок частиц [14, 15].

Преимуществом ХГН по сравнению с другими процессами газотермического напыления является отсутствие высоких температур, а следовательно, нет температурных деформаций поверхности, окисления, пористости, фазовых превращений и остаточных напряжений [16, 17]. Кроме того, ХГН обладает еще одним техническим преимуществом – возможностью механизации процесса напыления, т.е. использования манипулятора для напыления или рабочего стола с числовым программным управлением для перемещения заготовки и обработки крупногабаритных или сложных поверхностей.

Особый интерес для применения ХГН представляет нанесение металлического покрытия на неметаллические поверхности, такие как пластмассы, ткани или композиционные материалы. В последнее время ХГН с необходимыми модификациями все чаще используется для металлизации таких материалов, но все же представляет определенные сложности.

До недавнего времени ХГН в основном использовался для нанесения металлических покрытий на металлические подложки. Что касается напыления на неметаллические поверхности, то работ по данной тематике не так много. Известно, что эрозия подложки является ключевой проблемой и особенно критической для КМ, армированных углеродными или стеклянными волокнами [18–22]. Кроме того, при воздействии высоких температур происходит разрушение термоактивных материалов [22].

В работе отмечается, что образование покрытия на полимерах может быть получено при условии, что энергия удара частиц, рассчитанная через критическую скорость для данного материала и массу частицы, достаточно мала. Согласно этому олово и свинец будут легко напыляться; для алюминия будут характерны процессы напыления и эрозии, а для меди будет преобладать процесс эрозионного разрушения поверхности подложки [17]. Это предположение было подтверждено для олова, которое было нанесено на различные неметаллические подложки (PC/ABS, полипропилен, полистирол и полиамид-6

[17]. Напыление алюминия осуществлялось на РЕЕК [21] и Lexan [23], однако в случае с Lexan процесс напыления был возможен только при высоких скоростях подачи порошка. Дополнительные проходы при напылении алюминия приводили к уплотнению покрытия [24]. Тонкое медное покрытие было достигнуто на РА66 [25]. После напыления первого слоя произошла эрозия и дальнейшее напыление было затруднительным. Вероятно, это вызвано изменением поверхности подложки на металлическую и, следовательно, изменением параметров, необходимых для нанесения покрытия.

В работе было доказано предположение, что процесс эрозии может быть ограничен при использовании порошков с разной формой частиц и напылении подслоя. Толстые медные покрытия были достигнуты на ПВХ и эпоксидном материале [21]. Также было отмечено, что осаждение металлов на термоактивные подложки более затруднено из-за их большей хрупкости. Воздействие частиц порошка вызывает эрозию поверхности вместо ее пластической деформации.

Эффективность напыления на полиамид-6 также зависит от формы и степени окисления порошка. Уже было доказано, что некоторые напряжения остаются в порошке после производственного процесса [26], который вместе с тонким оксидным слоем увеличивает критическую скорость. Эти напряжения могут быть уменьшены путем термообработки, что приводит к более низкой критической скорости и, следовательно, к лучшим свойствам осаждения.

### Механизм формирования покрытий

На рис. 1 схематически показан процесс взаимодействия сферических частиц меди с подложками из полимера PVC (а) и эпоксидной смолы (б) [22].

Как видно из рис. 1, разогнанные частицы меди глубоко проникают в полимерную подложку и обволакиваются с боков полимером (а). Для эпоксидной подложки высокоскоростное воздействие частиц меди вызывает хрупкое разрушение вблизи области контакта и оставляет более широкий кратер (рис. 2 [22]). Из вышеприведенных результатов видно, что сферическая медная частица не подходит для наращивания покрытия. Возможно, есть две убедительные причины отказа от использования сферических частиц, особенно для подложек из PVC.

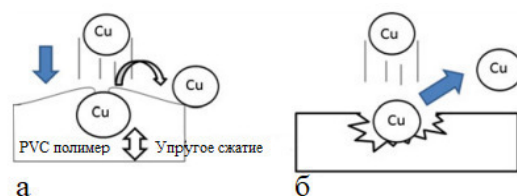


Рис. 1. Схематическое изображение взаимодействия сферической медной частицы с подложками: а – PVC; б – эпоксидная смола

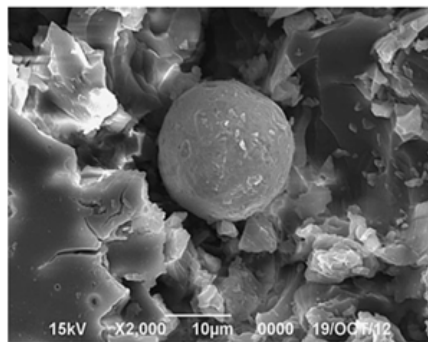


Рис. 2. SEM изображение сферической медной частицы в кратере на эпоксидной подложке

Во-первых, эффект подушки полимера рассеивает часть энергии удара, которая необходима для сцепления между частицами. Во-вторых, полимерная пленка на верхнем крае внедренных частиц выступает в качестве барьера и препятствует образованию связи с последующими частицами.

На рис. 3 показано схематическое изображение взаимодействия дендритной частицы и частицы олова с полимерной подложкой [22]. Площадь поверхности частицы неправильной формы велика, поэтому частицы способны создать много контактов с подложкой и могут легко прикрепляться к обеим подложкам.

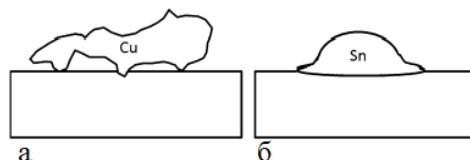


Рис. 3. Схематическое изображение частиц, нанесенных ХГН на полимерную подложку: а – дендритная медь; б – олово

Однако слабая связь, существующая между дендритной частицей и полимерной подложкой, не воспринимает энергии удара последующих частиц, поэтому сцепление меж-

ду частицами и, как следствие, наращивание покрытия, труднодостижимо. В свою очередь частицы олова деформируются при ударе о подложку из-за мягкости материала и образуют механическую связь с подложкой. На рис. 4 представлено SEM изображение, подтверждающее поведение вышеупомянутых частиц [22].

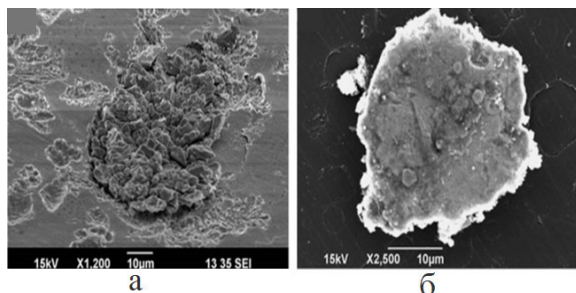


Рис. 4. SEM изображение частиц, нанесенных ХГН на полимерную подложку: а – дендритная медная частица; б – оловянная частица

Для создания толстого покрытия применяется концепция промежуточного слоя. Первоначально подложка из PVC покрыта сферическими/оловянными частицами, а затем верхний слой наращивается с использованием частиц дендритной формы. Механизм сцепления посредством межслойного наращивания покрытия изображен на рис. 5 [22]. Механизм сцепления дендритной частицы подробно описан в работе [21].

Отмечается, что дендритные частицы быстро ускоряются до высокой скорости из-за высокого коэффициента сопротивления. Хотя дендритные частицы обладают высокой скоростью, общая энергия удара эффективно минимизировалась в связи с несколькими точками контакта с подложкой из-за их большой и нерегулярной площади поверхности, что приводит к меньшей эрозии подложки. Кроме того, как показано на рис. 5, а, дендритные частицы из-за их большой площади поверхности могут образовывать несколько точечных контактов со сферическими частицами на начальной стадии, а затем точечные контакты увеличиваются в результате воздействия последующих частицы и, таким образом, могут в конечном итоге привести к металлической связи.

Аналогичное явление наблюдалось и для частиц олова (рис. 5, б), где частицы, благодаря своей мягкой природе, позволяют дендритным частицам образовывать лучшее сцепление на ее поверхности.

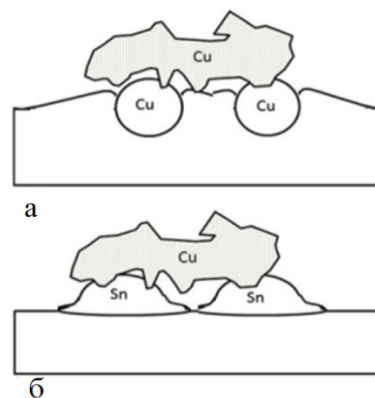


Рис. 5. Схематическое представление процесса напыления на подслои: а – подслои из сферических частиц меди; б – подслои олова

FIB изображение на рис. 6, а, б подтверждает описанный выше механизм и демонстрирует способность дендритной частицы формировать конформный контакт с частицами олова/сферической меди [22].

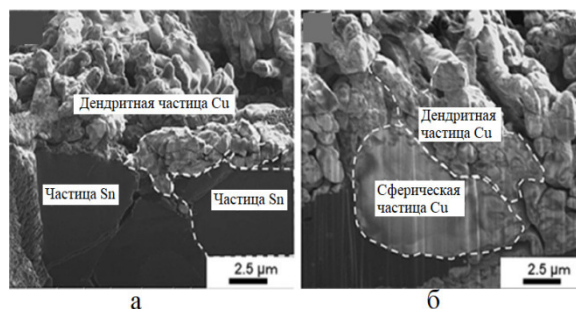


Рис. 6. FIB изображение границ контакта дендритной частицы меди: а – с частицами олова; б – со сферическими частицами меди

Наконец, результаты показывают, что толстое покрытие с большей вероятностью образуется на полимерной подложке, при использовании сферических частиц меди и подслоя из олова; дендритные частицы могут образовывать базовый слой на промежуточном слое, который может выдержать энергию удара последующих частиц и способствует наращиванию покрытия.

Таким образом, поверхность полимера первоначально покрывали сферическими частицами и оловянными частицами по отдельности, а на них наращивалось толстое покрытие с использованием дендритных частиц меди. Фактически сферические частицы меди и олова в конечном итоге повышали твердость поверхности PVC до такой степени, когда дендритные частицы могли деформироваться и образовывать толстое покрытие.

тие. На рис. 7, а, б показано покрытие, наращенное дендритными частицами на подложке из PVC. На рис. 7, в, г показаны границы контакта при высоком увеличении. Толщина покрытия варьировала от 800 до 1000 мкм.

Кроме того, было видно, что мелкие трещины проявляются на границе сферических и дендритных медных частиц, в то время как на границе раздела частиц олова и меди нет видимых трещин [21].

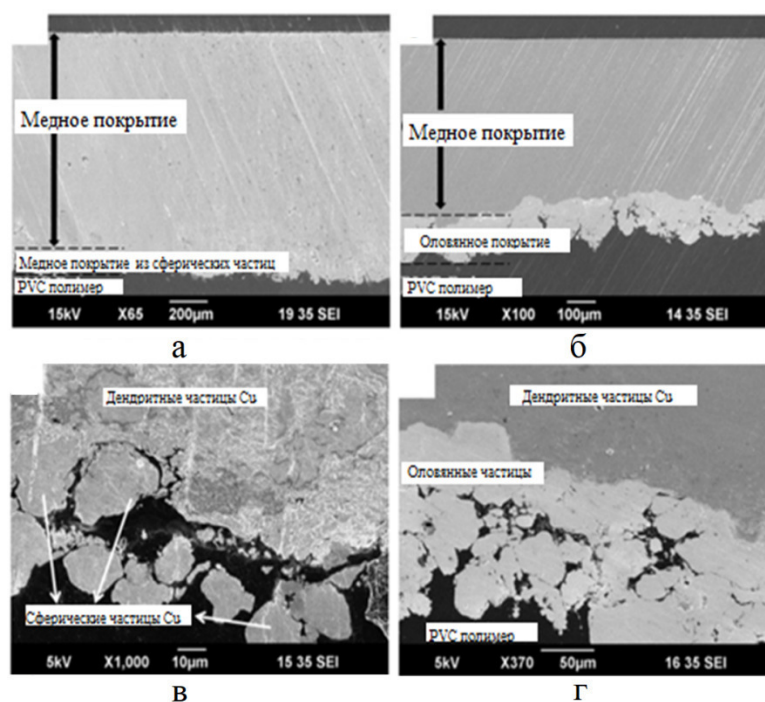


Рис. 7. Медное покрытие на подложке из PVC: а – покрытие из частиц меди сферической формы; б – медное покрытие на подслое из олова; в, г – границы контакта для данных покрытий

Существуют работы по формированию металлических покрытий на подложке из углепластика путем плазменного напыления [27–29]. Плазменное напыление алюминиевого покрытия использовалось в качестве промежуточного подслоя перед холодным напылением. Толщина покрытия составляла менее 15 мкм, что было достаточно для деформации частиц, напыляемых ХГН. Кроме того, тонкий подслоя не должен влиять на электрические свойства покрытия. Было обнаружено, что использование промежуточного слоя улучшает напыление частиц алюминия посредством ХГН. Толстые и плотные покрытия были успешно изготовлены на подложке из углепластика при температуре газа 300 и 400 °С. Промежуточное металлическое покрытие было ключевым моментом для напыления металлических частиц ХГН. Энергия удара напыляемых частиц может быть использована как для деформации частиц в подслое, так и для ударяющей частицы. Вышеупомянутое явление очень похоже на механизм связи покрытия для ХГН на металлической подложке. Кроме того, не наблюдалось эрозии между напыляемой ча-

стицей и подслоем, полученным плазменным напылением. Можно констатировать, что эрозионные свойства углепластика значительно улучшились за счет использования подслоя [18].

Напыление металлических частиц на пластиковую подложку ограничено для частиц с меньшей критической скоростью. Кроме того, мы не можем ожидать металлической связи между металлической частицей и пластиковой подложкой. Без достаточной деформации площадь контакта адгезии между частицей и подложкой оказывается малой. В то же время трудно предполагать формирование механического закрепления между покрытием и подложкой с малой деформацией частиц и чрезмерной деформацией подложки. В комбинации между алюминиевой частицей и подложкой из углепластика механизм адгезии считается физической связью, то есть силами Ван-дер-Ваальса. Области адгезии очень важны для достижения более высокой адгезионной прочности в этом соединении. Напыленные плазменным способом частицы алюминия также соединены физической связью в этой комбинации мате-

риалов. Однако расплавленные частицы могут легко образовывать большую площадь контакта по сравнению с частицами, напыляемыми ХГН. Обычно частицы алюминия, напыляемые ХГН на более твердые материалы подложки, могут деформироваться и создавать большую площадь контакта. Однако мягкий пластик (углепластик) поглощает энергию удара напыляемых частиц, что приводит к более слабому контакту. Покрытие может быть легко отслоено из-за небольшой площади контакта и термической усадки.

Экспериментальные результаты, полученные с медными, алюминиевыми и оловянными порошками, были обобщены на диаграмме, показанной на рис. 8, которая описывает начальную характеристику процесса ХГН, применяемого к полимерным подложкам [17].

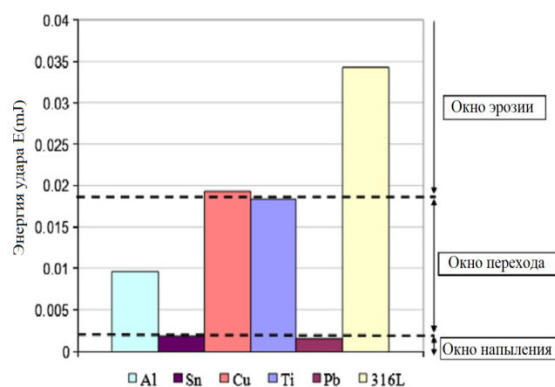


Рис. 8. Диаграмма начальной характеристики процесса ХГН для полимерных подложек

Результаты, полученные с использованием медного порошка, показали сильную эрозию подложки, в то время как алюминий порошок приводил лишь к незначительной эрозии поверхности, но не напылялся. С другой стороны, олово хорошо зарекомендовало себя, и покрытия были нанесены на различные пластики. Как следствие, диаграмма на рис. 8 была разделена на секции, каждая из которых описывает вероятное поведение напыления для соответствующего типа порошка.

В этой диаграмме границы зон для формирования покрытия представлены в виде прямых линий. На диаграмме указаны материал порошка и соответствующая энергия удара частиц, обладающих оптимальной скоростью напыления. Значения для напыления/критической скорости различных материалов и размеров частиц могут быть рассчитаны теоретическим методом, представленных в работе [30]. Для этого случая ис-

пользовались частицы диаметром 25 мкм, а средняя скорость в окне напыления была выбрана для каждого материала. Плотные и относительно прочные частицы материалов, такие как медь, могут генерировать энергию соударения  $E$  почти 0,02 мДж ( $E = mv^2 / 2$ ), где  $m$  – масса частицы,  $v$  – скорость напыления. Поскольку размеры частиц находятся в порядке микрон для применения в условиях ХГН, этот уровень энергии удара может привести к сильным контактным напряжениям; поэтому происходит эрозия полимерной подложки. С другой стороны, для металлов с более низкой прочностью, таких как олово, критическая скорость будет меньше; поэтому энергия удара, передаваемая на подложку, резко уменьшается, и формирование покрытия становится возможным. Из рис. 8 [17] следует, что частица меди может генерировать примерно в 10,7 раз больше энергии при ударе, чем олово. Для сравнения, легкие материалы (такие как алюминий), характеризующиеся низкой плотностью и высокой скоростью напыления, могут приводить к незначительной эрозии подложки, поскольку энергия удара относительно низкая. Однако напыление может быть осуществлено только с более сложными и дорогостоящими системами, способными разгонять частицы до величин их критических скоростей, такими как ХГН высокого давления с использованием гелия в качестве рабочего газа.

### Свойства покрытий ХГН на неметаллических поверхностях

Основными характеристиками покрытий ХГН являются адгезионная прочность, микротвердость и микроструктура. В случае напыления функциональных покрытий дополнительно проводят испытания на коррозионную стойкость, износостойкость, электропроводность и другие исследования. Кроме того, для оценки процесса используют показатель эффективности напыления – отношение прироста массы образца с покрытием после напыления (масса закрепившегося порошка) к полной массе используемого порошка.

В результате проведенного литературного обзора по вопросу холодного газодинамического напыления металлических покрытий на неметаллические поверхности, свойства полученных покрытий были проанализированы и записаны в сводную табл. 1.

Таблица 1 – Свойства покрытий ХГН на неметаллических поверхностях

Автор	Материал и размеры частиц порошка	Подложка	Режимы напыления	Адгезионная прочность	Микротвердость
Amirthan Ganesan и др. [21]	Медь (5–20 мкм); Олово (подслой) (5–20 мкм)	Поливинилхлорид	P = 2 МПа, T = 473 К, SOD = 30 мм	Медь: 1,93±0,7 МПа; Медь на подслое олова: 5,4±0,9 МПа	Медь: 152±2 HV; Медь на подслое олова: 154±2 HV
	<b>Электропроводимость</b>		<b>Примечания</b>		
	Медь: 11,39±1,6 мΩсм; Медь на подслое олова: 9,43±1 мΩсм		–		
Jon A. и др. [18]	Алюминий, (3 мкм и 15 мкм); Алюминий – подслоя (плазменное напыление)	Углеродпластик	P = 0,5 МПа, T = 600 °C, SOD = 20 мм	–	–
	17,1–26 мΩсм 54 мΩсм (плазменное напыление)		Al (15 мкм) – эрозия подложки; Al (5 мкм, P=0,5 мкм, T=600 °C) – покрытие толщиной 30 мкм; возможность напыления на подслоя алюминия		
Hanqing Che и др. [31]	Алюминий (25 мкм); Медь (29 мкм); Олово (17 мкм)	Углеродпластик	ХГНВД: P = 2–5 МПа, T = 100–400 °C, SOD = 20–80 мм, ХГННД: P = 0,29–1,38 МПа, T = 25–425 °C, SOD = 18 мм	Олово: 7,6 МПа (P = 0,41 МПа и T = 300 °C)	–
	–		Эрозия подложки при использовании ХГНВД для всех порошков; эрозия подложки при использовании ХГННД для медного порошка		
A. Malachowska и др. [32]	Алюминий (–53+11 мкм); Олово (–20+5 мкм)	Поликарбонат	P = 0,5–0,9 МПа, T = 200–400 °C, SOD = 10–30 мм	Олово: 5,6 МПа; Алюминий на подслое олова: 3 МПа	Алюминий: 46,8 HV0.1; Алюминий на подслое олова: 36,5 HV0.1; Олово: 10,8 HV0.1
	Алюминий на подслое олова: 25 мΩсм		При напылении алюминия без подслоя – эрозия подложки; возможно образование алюминиевого покрытия на подложке после пескоструйной обработки		
A. Malachowska и др. [33]	Медь (D10–5,94 мкм, D50–13,98 мкм, D90– 25,41 мкм); Олово+50 wt% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (D10–11,3 мкм, D50– 22,3 мкм, D90–40,6 мкм)	Полиамид - 6	P=0,9 МПа, T=200 °C, SOD=10 мм	Медь: 3,6±0,7 МПа; Олово: 5,4 ± 0,9 МПа	Медь: 125 HV0.1 ±12
	–		–		
X.L. Zhou и др. [20]	Алюминий (15–45 мкм); Медь (10–50 мкм)	Углеродпластик	P=1,2–1,9 МПа, T= 300–450 °C, SOD=15–20 мм	Среднее значение: 2,26 МПа	Алюминий: 42 HV0.1 Медь: 140 HV0.1 Al/Cu: 52 HV0.1
	–		Напыление биметаллического покрытия Al/Cu		

Как видно из табл. 1, средняя прочность сцепления металлических покрытий на КМ и пластиках 3,6 МПа, а электропроводимость для алюминиевых и медных покрытий соответственно 21,05  $\mu\Omega\text{см}$  и 10,41  $\mu\Omega\text{см}$ .

### Выводы

Проведенный анализ современного состояния вопроса в области формирования металлических покрытий на неметаллических поверхностях холодным газодинамическим напылением показал, что данная технология является перспективной и многообещающей для получения покрытий на композиционных материалах и пластиках.

В последнее время ХГН с определенными модификациями все чаще используется для металлизации таких материалов, но все же представляет определенные сложности. Для обеспечения электропроводимости неметаллических поверхностей применяют покрытия из меди, олова и алюминия. Для этих порошков на различных режимах процесса в условиях ХГН высокого давления была обнаружена эрозия, что считается основным препятствием для наращивания покрытий. Причиной тому является высокая скорость частиц в процессе ХГН высокого давления ( $P_0$  до 5 МПа), вызывающая чрезмерную эрозию подложки и предотвращающая осаждение. Чтобы свести к минимуму степень эрозии в процессе ХГН, была использована система ХГН низкого давления ( $P_0$  до 1 МПа).

Для создания толстого покрытия применяется концепция промежуточного слоя. Первоначально подложка из КМ или пластика покрывается подслоем из олова, для которого критическая скорость напыления мала и энергия соударения не приводит к разрушению поверхности подложки, а затем напыляют основное покрытие, например, медное. Проведенный анализ физико-механических характеристик покрытий на неметаллах показал, что технология ХГН может быть успешно использована для обеспечения электропроводимости и других свойств таких материалов. Рассмотрен механизм сцепления металлических покрытий с неметаллическими подложками, который отличается от традиционного механизма формирования покрытий на металлах при ХГН. Предполагается, что при металлизации КМ и пластиков ХГН сцепление частиц с подложкой осуществляется благодаря физическим связям (силы Ван-дер-Ваальса). Однако для лучшего понимания процесса механизма

сцепления металлических частиц с неметаллами, а также управления процессом и свойствами покрытий ХГН, необходимо проведение дальнейших исследований, что позволит расширить области применения композиционных материалов и пластиков в различных отраслях промышленности.

### Литература

1. Алхимов А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинов, В.Ф. Косарев и др. – М.: Физматлит, 2010. – 536 с.
2. Dykhuizen R.C. Gas Dynamic Principles of Cold Spray/ R.C. Dykhuizen, M.F. Smith // J. Therm. Spray Technol. – 1998. – Vol. 7. – P. 205–212.
3. Alkhimov A.P. The Features of Cold Spray Nozzle Design / A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, S.V. Klinkov // J. Therm. Spray Technol. – 2001. – Vol 10. – P. 375–381.
4. Sakaki K. Effect of the Increase in the Entrance Convergent Section Length of the Gun Nozzle on the High-Velocity Oxygen Fuel and Cold Spray Process / K. Sakaki, Y. Shimizu // J. Therm. Spray Technol. – 2001. – Vol. 10. – P. 487–496.
5. Sakaki K. Effect of Nozzle Geometry on Cold Spray Process / K. Sakaki, N. Huruhashi, K. Tamaki, Y. Shimizu // International Thermal Spray Conference: DVS Deutscher Verband für Schweißen. – Germany. – 2002. – P. 385–389.
6. Stoltenhoff T. Cold Spraying – State of the Art and Applicability / T. Stoltenhoff, J. Voyer, H. Kreye // International Thermal Spray Conference: DVS Deutscher Verband für Schweißen. – Germany. – 2002. – P. 366–374.
7. Zhang D. The Effect of Processing Variables on Deposition Characteristics of Aluminum by Cold Gas Dynamic Spraying / D. Zhang, P.H. Shipway, D.G. McCartney // Proc. Third Int. Conf. Surface Eng: Southwest Jiaotong Univ. Press. – Chengdu. – China. – 2002. – P. 105–110.
8. Bhagat R.B. Deposition of Nickel-Aluminum Bronze Powder by Cold Gas-Dynamic Spray Method on 2618 Al for Developing Wear Resistant Coatings / R.B. Bhagat, M.F. Amateau, A. Papyrin, J.C. Conway Jr., B. Stutzman, B. Jones // Thermal Spray: A United Forum for Scientific and Technological Advances: ASM International. – 1997. – P. 361–367.



9. Stoltenhoff T. Optimization of the Cold Spray Process / T. Stoltenhoff, H. Kreye, H.J. Richter, H. Assadi // *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium*: ASM International. – 2001. – P. 409–416.
10. Vicek J. Kinetic Powder Compaction Applying the Cold Spray Process: A Study on Parameters / J. Vicek, H. Huber, H. Voggenreiter, A. Fischer, E. Lugscheider, H. Hallén et al. // *Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium*: ASM International. – 2001. – P. 417–422.
11. Dykhuizen R.C. Impact of High Velocity Cold Spray Particles / R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, D.L. Gilmore, R.A. Neiser, X. Jiang, S. Sampath, // *J. Therm. Spray Technol.* – 1999. – Vol. 8. – P. 559–564.
12. Пургина С.М. Анализ проблемы создания и применения композитов с повышенной электропроводимостью / С.М. Пургина, Л.В. Смовзюк, В.Г. Ставиченко и др. // *Технологические системы.* – 2017. – Т. 78, №1. – С. 52–57.
13. Papyrin A.N. On the Interaction of High Speed Particles with a Substrate under the Cold Spraying / A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, A.P. Alkhimov // *International Thermal Spray Conference: DVS Deutscher Verband für Schweißen.* – Germany. – 2002. – P. 380–384.
14. Champagne V.K. The cold spray materials deposition process: fundamentals and applications / V.K. Champagne. – CRC Press. – Cambridge: Woodhead. – 2007. – 362 p.
15. Stoltenhoff T. An analysis of the cold spray process and its coatings / T. Stoltenhoff, H. Kreye, H.J. Richter // *J. Therm. Spray Technol.* – 2002. – Vol. 11(4). – P. 542–550.
16. Robitaille F. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process / F. Robitaille, M. Yandouzi, S. Hind, B. Jodoin // *Surf. Coat. Technol.* – 2009. – Vol. 203. – P. 2954–2960.
17. Lupoi R. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray / R. Lupoi, W. O'Neill // *Surf. Coat. Technol.* – 2010. – Vol. 205. – P. 2167–2173.
18. Affi J. Fabrication of Aluminum Coating onto CFRP Substrate by Cold Spray / J. Affi, H. Okazaki, M. Yamada, M. Fukumoto // *Mater. Trans.* – 2011. – Vol. 52. – P. 1759–1763.
19. Zhang D. Cold gas dynamic spraying of aluminum: The role of substrate characteristics in deposit formation / D. Zhang, P.H. Shipway, D.G. McCartney // *J. Therm. Spray Technol.* – 2005. – Vol. 14. – P. 109–116.
20. Zhou X.L. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray / X.L. Zhou, A.F. Chen, J.C. Liu, X.K. Wu, J.S. Zhang // *Surf. Coat. Technol.* – 2011. – Vol. 206. – P. 132–136.
21. Ganesan A. Bonding behavior studies of cold sprayed copper coating on the PVC polymer substrate / A. Ganesan, J. Affi, M. Yamada, M. Fukumoto // *Surf. Coat. Technol.* – 2012. – Vol. 207. – P. 262–269.
22. Ganesan A. Cold spray coating deposition mechanism on the thermoplastic and thermosetting polymer substrates / A. Ganesan, M. Yamada, M. Fukumoto // *J. Therm. Spray Technol.* – 2013. – Vol. 22. – P. 1275–1282.
23. Ye H. Preparation of aluminum coating on Lexan by cold spray / H. Ye, J. Wang // *Mater. Lett.* – 2014. – Vol. 137. – P. 21–24.
24. Giraud D. Metallization of a Polymer Using Cold Spray: Application to Aluminum Coating of Polyamide 66 / D. Giraud, F. Borit, V. Guipont, M. Jeandin, J.M. Malhaire // *Proceedings of the ITSC.* – Houston: ASM. – 2012. – P. 265–270.
25. Barletta M. Electrostatic spray deposition (ESD) of polymeric powders on thermoplastic (PA66) substrate / M. Barletta, A. Gisario, V. Tagliaferri // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – Vol. 201. – P. 296–308.
26. Assadi H. Determination of plastic constitutive properties of microparticles through single particle compression / H. Assadi, I. Irkhin, H. Gutzmann, F. Gärtner, M. Schulze, M. Villa Vidaller, T. Klassen // *Adv. Powder Technol.* – 2015. – Vol. 26. – P. 1544–1554.
27. Beydon R. Measurement of metallic coatings adhesion to fibre reinforced plastic materials / R. Beydon, G. Bernhart, Y. Segui // *Surface and Coatings Technology.* – 2000. – Vol. 126. – P. 39–47.
28. Chen C. Metallization of polyether ether ketone (PEEK) by copper coating via cold spray / C. Chen, X. Xie, Y. Xie, X. Yan, C. Huang, S. Deng, Z. Ren, H. Liao // *Surf. Coat. Technol.* – 2018. – Vol. 342. – P. 209–219.
29. Decla F. Plasma sprayed electrical conductive coating on CFRP materials: micro-

- structure and electrical properties / F. Decla, S. Leroux, G. Bernhart, C. Levaillant, N. Frety // *Surface Modification Technologies XI (UK)* . – 1998. – P. 293–299.
30. Schmidt T. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition / T. Schmidt, F. Gartner, H. Assadi, H. Kreye // *Acta Mater.* – 2006. – Vol. 54. – 729 p.
  31. Che H. Cold spray of mixed metal powders on carbon fibre reinforced polymers / H. Che, X. Chu, P. Vo, S. Yue // *Surface & Coatings Technology.* – 2017. – Vol. 329. – P. 232–243
  32. Małachowska A. Metallisation of polycarbonates using a low pressure cold spray method / A. Małachowska, M. Winnicki, M. Stachowicz, M. Korzeniowski // *Surface Engineering* . – 2017. – P. 251–258.
  33. Małachowska A. Possibility of spraying of copper coatings on polyamide 6 with low pressure cold spray method / A. Małachowska, M. Winnicki, Ł. Konat, T. Piwoarczyk, L. Pawłowski, A. Ambroziak, M. Stachowicz // *Surface & Coatings Technology.* – 2017. – Vol. 318. – P. 82–89.
- References**
1. Alhimov, A.P., Klinkov, S.V., Kosarev, V.F., Fomin, V.M. (2010). *Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teorija i praktika* [Gas dynamic cold spray. Theory and practice]. Moscow: Fizmatlit [in Russian].
  2. Dykhuizen, R.C., Smith, M.F. (1998). Gas Dynamic Principles of Cold Spray. *J. Therm. Spray Technol.*, 7, 205-212.
  3. Alhimov, A.P., Kosarev, V. F., Klinkov, S. V. (2001). The Features of Cold Spray Nozzle Design. *J. Therm. Spray Technol.*, 10, 375-381.
  4. Sakaki, K., Shimizu, Y. (2001). Effect of the Increase in the Entrance Convergent Section Length of the Gun Nozzle on the High-Velocity Oxygen Fuel and Cold Spray Process. *J. Therm. Spray Technol.*, 10, 487-496.
  5. Sakaki, K., Huruhashi, N., Tamaki, K., Shimizu, Y. (2002). Effect of Nozzle Geometry on Cold Spray Process. International Thermal Spray Conference.(pp. 385-389). Germany: DVS Deutscher Verband für Schweißen.
  6. Stoltenhoff, T., Voyer, J., Kreye, H. (2002) Cold Spraying—State of the Art and Applicability. International Thermal Spray Conference. 366-374. Germany: DVS Deutscher Verband für Schweißen.
  7. Zhang, D., Shipway, P.H., McCartney, D.G. (2002). The Effect of Processing Variables on Deposition Characteristics of Aluminum by Cold Gas Dynamic Spraying. Proc. Third Int. Conf. Surface Eng. 105-110. Chengdu: Southwest Jiaotong Univ. Press.
  8. Bhagat, R.B., Amateau, M.F., Papyrin, A., Conway Jr., J.C., Stutzman, B., Jones, B. (1997). Deposition of Nickel-Aluminum Bronze Powder by Cold Gas-Dynamic Spray Method on 2618 Al for Developing Wear Resistant Coatings Thermal Spray. A United Forum for Scientific and Technological Advances: ASM International, 361-367.
  9. Stoltenhoff, T., Kreye, H., Richter, H.J., Assadi, H. (2001). Optimization of the Cold Spray Process. Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium: ASM International, 409-416.
  10. Vicek, J., Huber, H., Voggenreiter, H., Fischer, A., Lugscheider, E., Hallén, H. et al. (2001). Kinetic Powder Compaction Applying the Cold Spray Process: A Study on Parameters. Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium: ASM International, 417-422.
  11. Dykhuizen, R.C., Smith, M.F., Gilmore, D.L., Neiser, R.A., Jiang, X., Sampath, S. (1999). Impact of High Velocity Cold Spray Particles. *J. Therm. Spray Technol.*, 8, 559-564.
  12. Purgina, S.M., Smovzjuk, L.V., Shestakov, P.V., Stavichenko, V.G., Shorinov, A.V. (2017). Analiz problemy sozdaniya i primeneniya kompozitov s povyshennoj jelektroprovodimost'ju [Analysis of the problem of producing and application of composites with increased electrical conductivity]. *Technologicheskiye sistemy - Technological systems*, 78, 52-57 [in Russian].
  13. Papyrin, A.N., Kosarev, V.F., Klinkov, S.V., Alhimov, A.P. (2002). On the Interaction of High Speed Particles with a Substrate under the Cold Spraying. International Thermal Spray Conference. 380-384. Germany: DVS Deutscher Verband für Schweißen.
  14. Champagne, V. K. (2007). The cold spray materials deposition process: fundamentals and applications. Cambridge: CRC Press.
  15. Stoltenhoff, T., Kreye, H., Richter, H.J. (2002). An analysis of the cold spray pro-

- cess and its coatings. *J. Therm. Spray Technol.*, 11, 542-550.
16. Robitaille, F., Yandouzi, M., Hind, S., Jodoin, B. (2009). Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. *Surf. Coat. Technol.*, 203, 2954-2960.
  17. Lupoi, R., O'Neill, W. (2010). Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray. *Surf. Coat. Technol.*, 205, 2167-2173.
  18. Affi, J., Okazaki, H., Yamada, M., Fukumoto, M. (2011). Fabrication of Aluminum Coating onto CFRP Substrate by Cold Spray. *Mater. Trans.*, 52, 1759-1763.
  19. Zhang, D., Shipway, P.H., McCartney, D.G. (2005). Cold gas dynamic spraying of aluminum: The role of substrate characteristics in deposit formation. *J. Therm. Spray Technol.*, 14, 109-116.
  20. Zhou, X.L., Chen, A.F., Liu, J.C., Wu, X.K., Zhang, J.S. (2011). Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray. *Surf. Coat. Technol.*, 206, 132-136.
  21. Ganesan, A., Affi, J., Yamada, M., Fukumoto, M. (2012). Bonding behavior studies of cold sprayed copper coating on the PVC polymer substrate. *Surf. Coat. Technol.*, 207, 262-269.
  22. Ganesan, A., Yamada, M., Fukumoto, M. (2013). Cold spray coating deposition mechanism on the thermoplastic and thermosetting polymer substrates. *J. Therm. Spray Technol.*, 22, 1275-1282.
  23. Ye, H., Wang, J. (2014). Preparation of aluminum coating on Lexan by cold spray. *Mater. Lett.*, 137, 2-24.
  24. Giraud, D., Borit, F., Guipont, V., Jeandin, M., Malhaire, J.M. (2012). Metallization of a Polymer Using Cold Spray: Application to Aluminum Coating of Polyamide 66. *Proceedings of the ITSC*. 265-270. Houston: ASM.
  25. Barletta, M., Gisario, A., Tagliaferri, V. (2006). Electrostatic spray deposition (ESD) of polymeric powders on thermoplastic (PA66) substrate. *Surf. Coat. Technol.*, 201, 296-308.
  26. Assadi, H., Irkhin, I., Gutzmann, H., Gärtner, F., Schulze, M., Villa Vidaller, M. et al. (2015). Determination of plastic constitutive properties of microparticles through single particle compression. *Adv. Powder Technol.*, 26, 1544-1554.
  27. Beydon, R., Bernhart, G., Segui, Y. (2000). Measurement of metallic coatings adhesion to fibre reinforced plastic materials. *Surface and Coatings Technology*, 126, 39-47.
  28. Chen, C., Xie, X., Xie, Y., Yan, X., Huang, C., Deng, S. et al. (2018). Metallization of polyether ether ketone (PEEK) by copper coating via cold spray. *Surf. Coat. Technol.*, 342, 209-219.
  29. Decla, F., Leroux, S., Bernhart, G., Levailant, C., Frety, N. (1998). Plasma sprayed electrical conductive coating on CFRP materials: microstructure and electrical properties. *Surface Modification Technologies XI*, 293-299.
  30. Schmidt, T., Gartner, F., Assadi, H., Kreye, H. (2006) Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Mater.*, 54, 729.
  31. Che, H., Chu, X., Vo, P., Yue, S. (2017). Cold spray of mixed metal powders on carbon fibre reinforced polymers. *Surface & Coatings Technology*, 329, 232-243.
  32. Małachowska, A., Winnicki, M., Stachowicz, M., Korzeniowski, M. (2017). Metallization of poly-carbonates using a low pressure cold spray method. *Surface Engineering*, 251-258.
  33. Małachowska, A., Winnicki, M., Konat, Ł., Piwowarczyk, T., Pawłowski, L., Ambroziak, A. et al. (2017). Possibility of spraying of copper coatings on polyamide 6 with low pressure cold spray method. *Surface & Coatings Technology*, 318, 82-89.

**Шоринов Александр Владимирович,**  
 младший научный сотрудник кафедры  
 технологии производства авиационных  
 двигателей,  
 +380669288229, [shorinov1@gmail.com](mailto:shorinov1@gmail.com)

**Волков Андрей Олегович,** младший науч-  
 ный сотрудник кафедры технологии про-  
 изводства авиационных двигателей,  
 +380996641007, [a.volkov@khai.edu](mailto:a.volkov@khai.edu)

**Маркович Сергей Евгеньевич,** канд. техн.  
 наук, доцент кафедры технологии произ-  
 водства авиационных двигателей,

**Национальный аэрокосмический универ-  
 ситет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский  
 авиационный институт», ул. Чкалова, 17,  
 Харьков, 61070, Украина,  
 +380677690536, [motor.khai@gmail.com](mailto:motor.khai@gmail.com)**

ХОЛОДНЕ ГАЗОДИНАМІЧНЕ  
НАПИЛЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ  
ПОКРИТТІВ НА КОМПОЗИЦІЙНІ  
МАТЕРІАЛИ ТА ПЛАСТИКИ: ЛІТЕРАТУР-  
НИЙ ОГЛЯД

Шорінов О.В., Волков А.О., Маркович С.Є.,  
Національний аерокосмічний університет  
ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ»

**Анотація.** З огляду на недостатність інформації про механізм утворення металевих покриттів на неметалевих підкладках і вивчення властивостей таких покриттів був проведений аналіз сучасного стану питання в галузі холодного газодинамічного напилення (ХГН) металевих покриттів на композиційні матеріали (КМ) з можливістю подальшого використання накопиченого досвіду для проведення подальших досліджень у цій сфері. У наш час композиційні матеріали на основі надтонких вуглецевих, скляних, органічних та інших типів волокон в поєднанні з полімерними сполучними матеріалами досить широко застосовуються в різних галузях техніки. Разом з відмінними властивостями КМ і пластиків існують і недоліки: низька ерозійна стійкість, електропровідність і невисокі робочі температури. Для усунення перерахованих вище недоліків застосовують металеві покриття, що дозволяє забезпечити задані властивості поверхонь і розширити галузі застосування неметалічних матеріалів. У наш час для металізації пластиків і КМ з полімерною матрицею використовують лише кілька методів, а саме: фізичне і хімічне осадження з парової фази, гальванізацію, гальванопластику і газотермічне напилення. Але ці методи мають недоліки: висока вартість обладнання і процесу металізації, обмеження за розміром зразків і площею металізації, низька адгезійна міцність покриттів, забруднення навколишнього середовища і загроза здоров'ю персоналу і т.д. Зростаючий попит на низькоенергетичні, екологічно безпечні, ефективні і недорогі процеси нанесення покриттів стимулюють пошук і розробку нових альтернативних методів, одним з яких є ХГН. Проведений аналіз сучасного стану питання в галузі формування металевих покриттів на неметалевих поверхнях ХГН показав, що дана технологія є перспективною для формування покриттів на неметалах і може бути успішно використана для забезпечення електропровідності та інших властивостей КМ і пластиків.

**Ключові слова:** холодне газодинамічне напилення, композиційні матеріали, покриття, властивості покриттів.

COLD GAS DYNAMIC SPRAYING OF  
METALLIC COATINGS ON COMPOSITE  
MATERIALS AND PLASTICS: LITERATURE  
REVIEW

Shorinov O.V., Volkov A.O., Markovych S.Ye.,  
National Aerospace University named  
after N.E Zhukovskogo «KhAI»

**Abstract. Problem.** The analysis of the current state of the problem in the field of cold gas-dynamic spraying (CS) of metallic coatings on composite materials (CM) and plastics has been conducted in order to gain experience for further research in this field and better understanding of the mechanism of forming metallic coatings on nonmetallic substrates as well as to study the properties of such coatings. At present, composite materials based on ultrathin carbon, glass, organic and other types of fibers in combination with polymer binding materials are widely used in various branches of engineering. Along with excellent properties of CM and plastics, there are also disadvantages such as low erosion resistance, electrical conductivity and low operating temperatures. To eliminate the aforementioned shortcomings, metal coatings are used, which makes it possible to provide specified surface properties and expand the scope of application of non-metallic materials. **Methodology.** Nowadays only a few methods are used to metallize plastics and CM with a polymer matrix, namely physical and chemical vapor deposition, galvanization, electroforming and gas-thermal spraying. But these methods have disadvantages, such as high cost of equipment and metallization process, limitation of sample size and metallization area, low adhesion strength of coatings, environmental pollution and personnel health hazards, etc. **Results.** The use of the cold spraying method makes it possible to overcome the shortcomings of CM and to obtain new opportunities. **Originality.** The increasing demand for low-energy, environmentally safe, efficient and low-cost coating processes encourages the search for and the development of new alternative methods, one of which is cold spraying. **Practical significance.** The analysis of the current situation in the field of formation of metallic coatings on non-metallic surfaces by cold gas-dynamic spraying has shown that this technology is promising for the formation of coatings on nonmetals and it can be successfully used to provide electrical conductivity and other properties of CM and plastics.

**Key words:** cold gas-dynamic spraying, composite materials, coatings, coating properties