

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Шикалов Владислав Сергеевич

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы
(диссертации)

*«Исследование особенностей холодного газодинамического напыления на
материалы с низкой эрозионной стойкостью»*

Направление подготовки:

01.06.01 – Математика и механика

Специальность подготовки: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы;

Научный руководитель

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Клинков Сергей Владимирович

Новосибирск 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) изначально применялся для получения покрытий на материалах, которые не подвержены существенной эрозии под действием сверхзвуковой двухфазной струи (например, на металлах, сплавах и твёрдых керамиках). Факт увеличения коэффициента напыления с ростом скорости удара частиц привёл к выработке концепции, согласно которой необходимо придать частицам максимально возможную скорость [1]. В связи с этим для ускорения частиц в ХГН применяются сверхзвуковые сопла Лавалья, высокие давления торможения (до 5 МПа) и в некоторых случаях лёгкие газы (например, гелий). Также известно, что под действием удара частиц о преграду процесс эрозионного разрушения последней всё же имеет место быть. В случаях достаточно прочных материалов преград этим процессом можно пренебречь, если коэффициент напыления существенно выше коэффициента эрозии. В случаях, когда прочность материала преграды оказывается недостаточной, чтобы противостоять удару частиц, то вместо процесса напыления наблюдается процесс эрозии. К таким материалам можно отнести, например, полимеры и композиты, проблеме металлизации которых стали уделять внимание сравнительно недавно [2–9]. Однако единого взгляда на процесс перехода от эрозии преграды к образованию на ней покрытия среди исследователей до настоящего времени не сложилось. Также в имеющихся работах слабо исследовано влияние критической скорости ускоряемых частиц на процесс ХГН. Как результат, поиск общих закономерностей процесса эрозионно-адгезионного перехода при ХГН на сегодняшний день остаётся актуальным.

Целью работы является изучение процесса эрозионно-адгезионного перехода при взаимодействии двухфазной струи (газ + твёрдые частицы) с поверхностью эродируемой композиционной преграды в условиях холодного газодинамического напыления.

Задачи исследования

1. Исследование возможностей применения эжекторных сопел в ХГН. Определение зависимостей скорости металлических частиц, ускоряемых в эжекторном и звуковом сопле от геометрии сопла и параметров рабочего газа.
2. Исследование влияния скорости частиц и параметров рабочего газа на процесс эрозионно-адгезионного перехода на эродируемой преграде.
3. На основе полученных данных выявление особенностей эрозионно-адгезионного перехода в случае натекания двухфазной струи на эродируемую преграду.

Научная новизна

Впервые проведены исследования возможностей применения эжекторного сопла для ХГН, которые показали, что использование таких сопел позволяет гибко варьировать параметры потока, влияющие на скорость частиц.

Впервые экспериментально установлено, что скорости частиц в струях, истекающих из звукового сопла, оказываются существенно ниже скоростей частиц, ускоренных в сопле Лаваля и эжекторном сопле при высоких давлениях, что позволяет снизить эрозионное воздействие частиц на преграду.

Впервые определены критические значения параметров (давление и температура торможения газа, скорость частиц, температура в приконтактной области), при которых начинается процесс формирования покрытия на эродируемой преграде.

Научная и практическая значимость работы

Описание начальных адгезионных явлений (формирование необходимого рельефа потоком частиц для активации напыления, зарождение отдельных кластеров покрытия и др.) необходимо для понимания научных основ явления ХГН. Исследование факторов, обуславливающих переход от эрозии преграды к образованию на ней покрытия, позволит выработать рекомендации по получению покрытий на материалах склонных к

эрозионному разрушению при натекании высокоскоростной двухфазной струи.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием надёжных апробированных методик и средств измерений. Ключевые результаты научно-квалификационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях.

На защиту выносятся:

- Результаты исследования влияния параметров рабочего газа (давление и температура торможения) и геометрии сопла на скорость металлических частиц в струях, истекающих из эжекторного и звукового сопла.
- Результаты исследований процесса эрозионно-адгезионного перехода при соударении твердых нерасплавленных частиц с эродируемой композиционной преградой в условиях ХГН.
- Критические значения параметров (давление и температура торможения газа, скорость удара частиц, температура в приконтактной области), при которых начинается процесс формирования покрытия на эродируемой преграде.

Апробация работы

Основные положения научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях и семинарах, таких как:

Всероссийская школа-конференция с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2014);

XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Пермь, 2016);

Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2017, 2018);

XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (Новосибирск, 2017);

VII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2017);

Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск-Шерегеш, 2017, 2018, 2019, 2020);

XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Новосибирск, 2018);

XVI Всероссийский семинар с международным участием «Динамика многофазных сред» (Новосибирск, 2019).

Публикации

Основные результаты научно-квалификационной работы опубликованы в 17 статьях и докладах, среди которых 4 статьи в рецензируемых журналах входящих в перечень ВАК, 1 статья в рецензируемом журнале и 12 публикаций в трудах конференций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Описание экспериментального оборудования и методик, используемых в работе

В данной работе для напыления использовалась экспериментальная установка собственного изготовления (ИТПМ СО РАН, Россия), состоящая из дозатора порошка барабанного типа, омического нагревателя и форкамерно-соплового узла, размещённых в пыле- и шумозащитной камере. Рабочий газ подаётся в форкамеру с заданным давлением торможения до 4 МПа и температурой торможения до 1200 К, оборудование позволяет поддерживать данные параметры с высокой точностью (1 К по температуре и 0,01 МПа по давлению). Системой позиционирования служит промышленный 6-осевой робот KR16-2 (KUKA, Германия). Форкамерно-сопловые узлы являются сменными, и в настоящей работе использовались

несколько их конфигураций, в том числе разработанные в ИТПМ СО РАН, которые описаны ниже.

Сопло Лавалья. Для ускорения частиц в ХГН одними из первых стали применяться сопла Лавалья круглого и прямоугольного сечений. При заданном поперечном размере критического сечения (обычно 2 – 3 мм), размеры выходного сечения подбираются из требования, чтобы число Маха на срезе сопла было 2 – 3. Такие сопла оптимизируются для ускорения микрочастиц с учётом их торможения в сжатом слое газа между головной ударной волной и поверхностью преграды. В работе использовалось осесимметричное сопло Лавалья, изготовленное из сплава WC-Co, длиной 130 мм и диаметрами критического и выходного сечения 2,8 мм и 6,5 мм соответственно.

Эжекторное сопло. Использование эжекторных сопел позволяет применять для порошкового питания установки напыления дозатор открытого типа, работающий при атмосферном давлении. Конструкция эжекторного сопла, используемого в настоящей работе, позволяет производить подстройку за счёт перемещения конуса центрального тела вдоль оси сопла, и тем самым гибко варьировать параметры потока, влияющие на скорость частиц. Диаметр выходного сечения и диаметр в окрестности критики сопла были равны 7 и 5,5 мм соответственно, длина сопла составляла 150 мм, угол конуса центрального тела эжектора равен 28° .

Звуковое сопло. При низких давлениях торможения использование сверхзвуковых сопел затруднительно из-за возникновения отрыва потока от стенок сопла, поэтому для дальнейших экспериментов использовалось звуковое сопло. Сопло, изготовленное из нержавеющей стали 12X18H10T, состояло из форкамеры постоянного сечения диаметром 16 мм и длиной 110 мм, а также сужающегося под углом 20° участка длиной 20 мм с выходным диаметром 6 мм.

Для измерения скорости частиц использовался метод лазер-трёхимпульсной тенеграфии (ИТПМ СО РАН, Россия). На полученных

снимках с изображениями частиц проводилось измерение расстояния между крайними изображениями частиц, и затем вычислялась скорость частиц по известному значению времени. Обработка большого числа таких фотографий позволяет построить распределение частиц по скоростям и вычислить их среднюю скорость.

Исследование рельефа получаемых покрытий и следов эрозии, проводилось на бесконтактном интерференционном профилометре ContourGT-K1 (Bruker, США), принцип действия которого заключается в том, что свет, излучаемый с источника, отражаясь от исследуемой поверхности, формирует интерференционную картину, которая затем регистрируется видеокамерой. Данные обрабатываются, и набор интерференционных картин преобразуется в карту уровней поверхности высокого разрешения.

В качестве напыляемого материала использовался алюминиевый порошок марки АСД-1 со средним размером частиц 27 мкм.

В качестве подложки для напыления использовались пластины из композиционной керамики (красного керамического кирпича) размером 50×50×12 мм.

Глава 2. Исследование эрозионно-адгезионного перехода при напылении на эродируемую преграду с использованием эжекторного сопла

Первые попытки получения покрытий с использованием сверхзвукового сопла показали, что в этих условиях имеет место активный процесс эрозии поверхности подложки. Частицы алюминия ускорялись в сопле Лаваля с числом Маха на срезе, равном 2–3, при давлении торможения ускоряющего частицы воздуха 1,5–2 МПа и температуре торможения 500–550 К. Эксперименты показали, что скорость удара твёрдых (нерасплавленных) частиц алюминия в приведённых выше условиях оказывается достаточно высокой (500–550 м/с), и их взаимодействие с поверхностью материала преграды ведет к достаточно сильной эрозии последней.

Одной из главных особенностей течения газа в эжекторном сопле является наличие смешения сверхзвукового (эжектирующего) и дозвукового (эжектируемого) потоков. Расход эжектируемого воздуха обеспечивает транспортировку частиц порошка из дозатора в сопло. Экспериментально установлено, что при давлении на входе в эжектор 0,095 МПа обеспечивается необходимый расход воздуха.

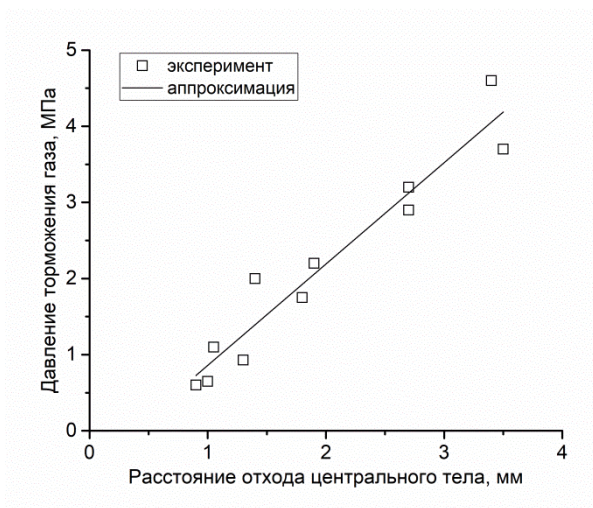


Рис. 1. Связь давления эжектирующего воздуха в форкамере эжекторного сопла с величиной отхода центрального тела из положения полного перекрытия критического сечения.

Показано, что положение центрального тела непосредственно влияет на размеры критического сечения сопла и малейшие его перемещения вдоль оси (порядка 0,1 мм) приводят к значительным изменениям измеряемых давлений (0,1 – 0,5 МПа). Имея данную зависимость (рис. 1), можно определить необходимую величину отхода/заглубления центрального тела, если известно давление

торможения рабочего воздуха, которое определяется условиями напыления.

Частицы алюминиевого порошка, используемого в напылении, имеют достаточно крупный размер (27 мкм), поэтому скорость их удара о подложку оценивалась по их скорости в свободной струе на расстоянии равном расстоянию от среза сопла до поверхности подложки (в данном случае 30 мм), предполагая, что они не тормозятся в ударно-сжатом слое газа, возникающем перед поверхностью подложки.

На рис. 2 представлены результаты измерения скоростей алюминиевых частиц, в струях, истекающих из эжекторного сопла при различных давлениях торможения воздуха в форкамере сопла, а также сравнение со скоростями частиц, ускоряемых в осесимметричном сопле Лавалья.

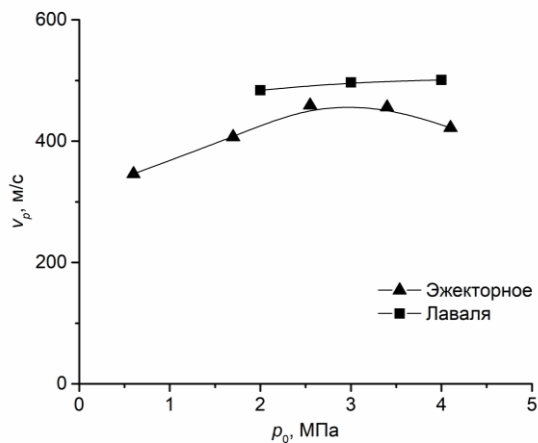


Рис. 2. Сравнение средних скоростей алюминиевых частиц в свободных струях, истекающих из осесимметричного сопла Лавалия и эжекторного сопла при разных давлениях рабочего воздуха и температуре торможения 300 К.

Как видно из рис. 2, существует диапазон давлений в форкамере ($3 \pm 0,2$ МПа), когда скорость частиц достигает максимального значения. В этом диапазоне давлений скорость частиц, ускоренных в эжекторном сопле, оказывается ненамного меньше (~ 50 м/с), чем их скорость при ускорении в сопле Лавалия при одинаковых давлениях в форкамере. Можно предположить, что при таких режимах эжекторное сопло может

эффективно использоваться в напылении на твёрдые преграды наравне с соплами Лавалия. Наиболее вероятное объяснение снижения скорости частиц при давлениях выше 3 МПа заключается в особенности работы эжектора. Для увеличения давления в форкамере при сохранении давления на входе эжектора необходимо более глубоко вдвигать центральное тело в сопло. Отсюда следует, что, начиная с какого-то момента, расход основного газа начнёт уменьшаться, что должно будет привести к падению скорости частиц.

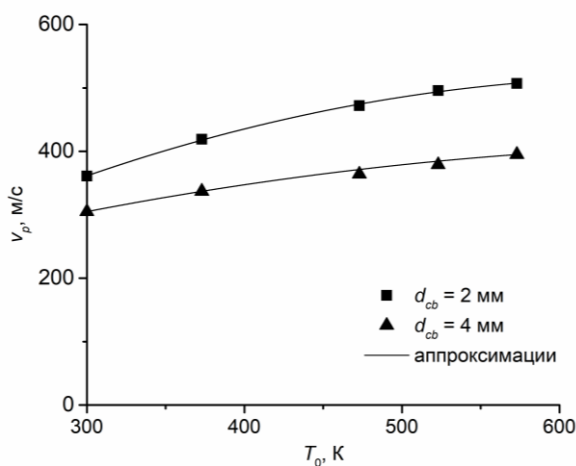


Рис. 3. Зависимости средней скорости частиц от температуры торможения рабочего воздуха для двух геометрических конфигураций эжектора с диаметрами канала в центральном теле 2 и 4 мм при постоянном давлении торможения 1,5 МПа.

На рис. 3 представлены результаты измерения скоростей частиц в струях на расстоянии 30 мм от среза эжекторного сопла (дистанция напыления) в диапазоне температур рабочего газа 300 – 573 К при давлении рабочего (эжектирующего) воздуха в форкамере 1,5 МПа. Видно, что с увеличением температуры газа увеличивается и скорость частиц. Полученные данные показывают, что для эжекторного сопла с $d_{cb} = 4$ мм характерны более низкие скорости частиц, чем для сопла с $d_{cb} = 2$ мм. Это отличие увеличивается с ростом температуры торможения от 300 до 573 К с 55 до 110 м/с, соответственно.

Измеряемая в экспериментах по ХГН величина коэффициента напыления является интегральным коэффициентом изменения массы, т.к. при формировании покрытия на данном материале вместе с напылением также проходит процесс эрозии. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента изменения массы подложки от температуры торможения рабочего воздуха (рис. 4а) и от скорости частиц (рис. 4б), полученные пересчётом с использованием данных, представленных на рис. 3 для двух геометрических конфигураций эжектора.

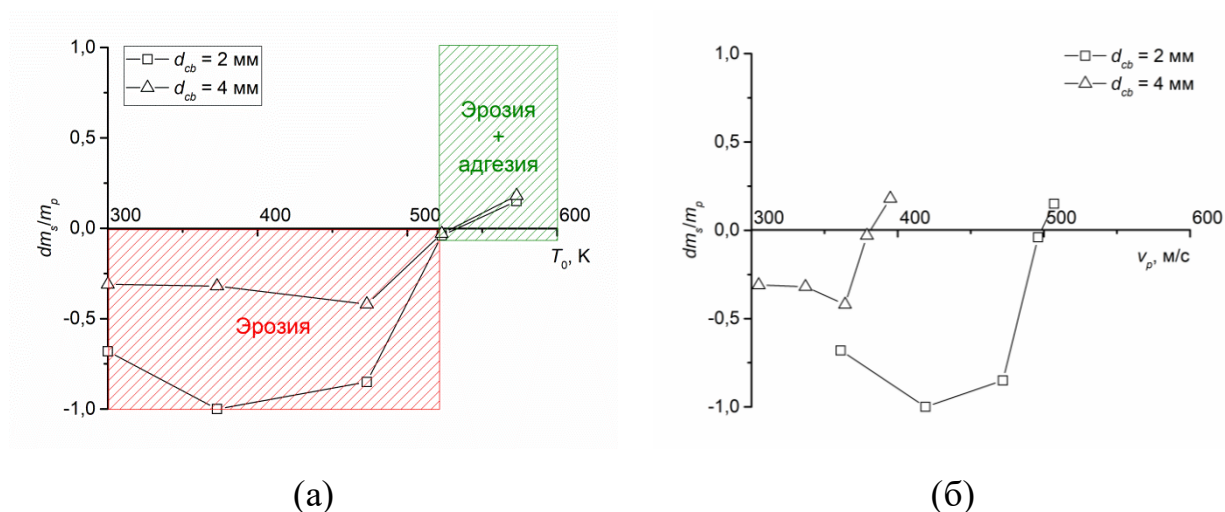


Рис. 4. Зависимость изменения массы подложки от температуры торможения рабочего воздуха (а) и скорости частиц (б).

Показано, что эрозионно-адгезионный переход для обеих конфигураций эжекторного сопла наблюдается примерно при одинаковой температуре торможения газа (около 520 К), несмотря на то, что скорости частиц заметно

отличаются (разница более 100 м/с). При более низких температурах торможения наблюдается эрозия, причём более высоким скоростям соответствует более высокое значение коэффициента эрозии, что не противоречит общефизическим представлениям.

При взаимодействии гетерогенного потока с преградой одновременно происходит как образование на ее поверхности покрытия, так и эрозионное разрушение преграды. Можно записать зависимость общего коэффициента изменения массы преграды (что фактически и измеряется в эксперименте) от скорости частиц как разность коэффициентов напыления и эрозии (1)

$$k_{de} = \frac{m_c}{m_p} - \frac{m_{er}}{m_p} \quad (1)$$

где m_c – масса покрытия, m_{er} – масса эродированного материала, m_p – масса частиц, взаимодействующих с поверхностью.

Согласно литературным данным масса эрозии определяется выражением (2) [10]:

$$m_{er} = m_p \frac{v_p^2}{2H_{er}}, \quad (2)$$

где H_{er} – энтальпия эрозионного разрушения.

Следует заметить, что в случаях, когда одновременно с процессом эрозии происходит напыление, то вместо m_p необходимо использовать разность $m_p - m_c$, так как закрепившиеся частицы не участвуют в процессе эрозии (3).

$$k_{er} = \frac{m_p - m_c}{m_p} \frac{v_p^2}{2H_{er}} \quad (3)$$

Зависимость коэффициента напыления от скорости выбиралась в виде (4) [11].

$$\frac{m_c}{m_p} = 1 - \exp \left[-a \exp \left(-\frac{u^*}{v_p} \right) \right] \quad (4)$$

Коэффициенты a , u^* и H_{er} подбирались на основе экспериментальных данных по измерению коэффициента k_{de} .

На рис. 5 показан вид зависимости от скорости частиц коэффициентов изменения массы преграды, эрозии и напыления для случая взаимодействия алюминиевых частиц с кирпичной преградой.

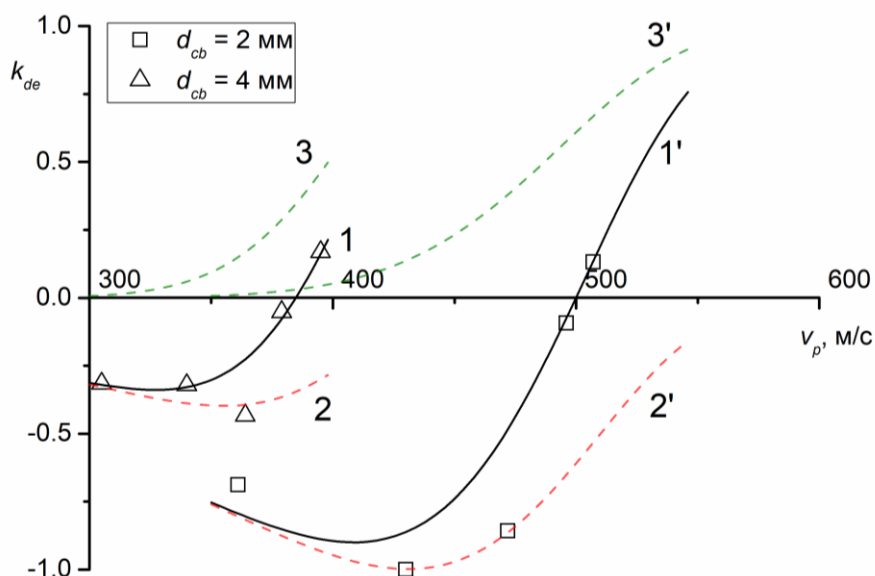


Рис. 5. Зависимость от скорости коэффициентов изменения массы преграды (1, 1'), эрозии (2, 2') и напыления (3, 3') при взаимодействии алюминиевых частиц с кирпичной преградой. Цифры без штрихов соответствуют случаю ускорения частиц эжекторным соплом с диаметром 4 мм, со штрихами – с диаметром 2 мм. Значками отмечены экспериментальные данные.

Наблюдаемое изменение массы подложки от скорости частиц качественно может быть описано в рамках предложенной модели. Следует также отметить, что после образования сплошного монослоя покрытия ход кривых изменится, поскольку этот слой будет препятствовать дальнейшей эрозии материала преграды. Более холодному потоку соответствуют большие коэффициенты эрозии, а эрозионно-адгезионный переход смещается в сторону более высоких скоростей. Можно заключить, что в случае ускорения частиц потоком без подогрева газа (например, гелием), эрозионно-адгезионного перехода может и не быть. В обратном случае, если снижать

скорость частиц, сохраняя при этом температуру торможения газа, возможно, что переход может наступить при ещё меньших скоростях частиц.

Глава 3. Исследование процесса напыления на эродируемую преграду с использованием звукового сопла

Дальнейшие эксперименты по напылению проводились в характерном диапазоне давлений торможения 0,25 – 0,5 МПа. При таких низких давлениях использование типичных сверхзвуковых сопел затруднительно из-за возникновения отрыва потока от стенок сопла. Применение звуковых сопел, в которых скорость истечения газа достигает скорости звука на срезе, позволяет существенно уменьшить давление торможения газа без эффекта отрыва потока внутри сопла и, соответственно, снизить скорость напыляемых частиц. В этом случае истечение газа происходит в режиме недорасширения, т.е. когда статическое давление в потоке на срезе сопла выше атмосферного и составляет для воздуха 0,528 от давления торможения. Это приводит к расширению струи на начальном участке («бочке») и ускорению газа до сверхзвуковых скоростей не в сопле, а в струе.

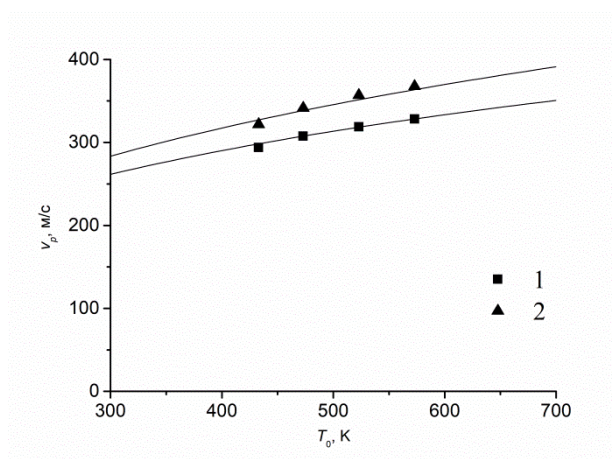


Рис. 6. Зависимость скорости частиц вблизи оси струи, истекающей из звукового сопла с диаметром выходного сечения от температуры торможения.
1 – $p_0 = 0,25$ МПа, 2 – $p_0 = 0,5$ МПа, сплошные линии – аппроксимации.

Результаты измерений (рис. 6) показали, что скорости частиц в струях, истекающих из звукового сопла, оказываются существенно ниже (более чем на 150 м/с) скоростей частиц, ускоренных в сопле Лавалья и эжекторном сопле при высоких давлениях, что может позволить снизить эрозионное воздействие частиц на подложку. На рис. 6 видно, что при увеличении давления в форкамере от 0,25 до

0,5 МПа скорость частиц увеличивается примерно на 30 – 40 м/с. Увеличение

температуры на 140 К (от 433 до 573 К) при обоих давлениях даёт прирост скорости примерно на такую же величину (~ 40 м/с).

На рис. 7а приведена фотография дорожек взаимодействия двухфазной струи с поверхностью подложки, полученных при давлении в форкамере 0,25 МПа, а на рис. 7б — их соответствующие усредненные профили. Можно видеть (кривая 1 на рис. 7б), что при температуре 433 К наблюдается только эрозия подложки глубиной несколько меньше 1 мм, закрепившихся частиц нет. Закрепление частиц на поверхности подложки начинается при температуре рабочего газа 473 К. При этом образуется зона эрозии подложки шириной около 9 мм и глубиной около $\sim 0,3$ мм (кривая 2 на рис. 7б), в которой формируется дорожка покрытия из алюминия. При повышении температуры коэффициент напыления начинает расти, ширина и высота дорожки покрытия увеличиваются. При температуре 573 К формируется дорожка покрытия с клиновидным профилем высотой примерно $\sim 1,5$ мм и шириной ~ 6 мм, глубина эрозии при этом оказывается заметно меньше (кривая 4 на рис. 7б).

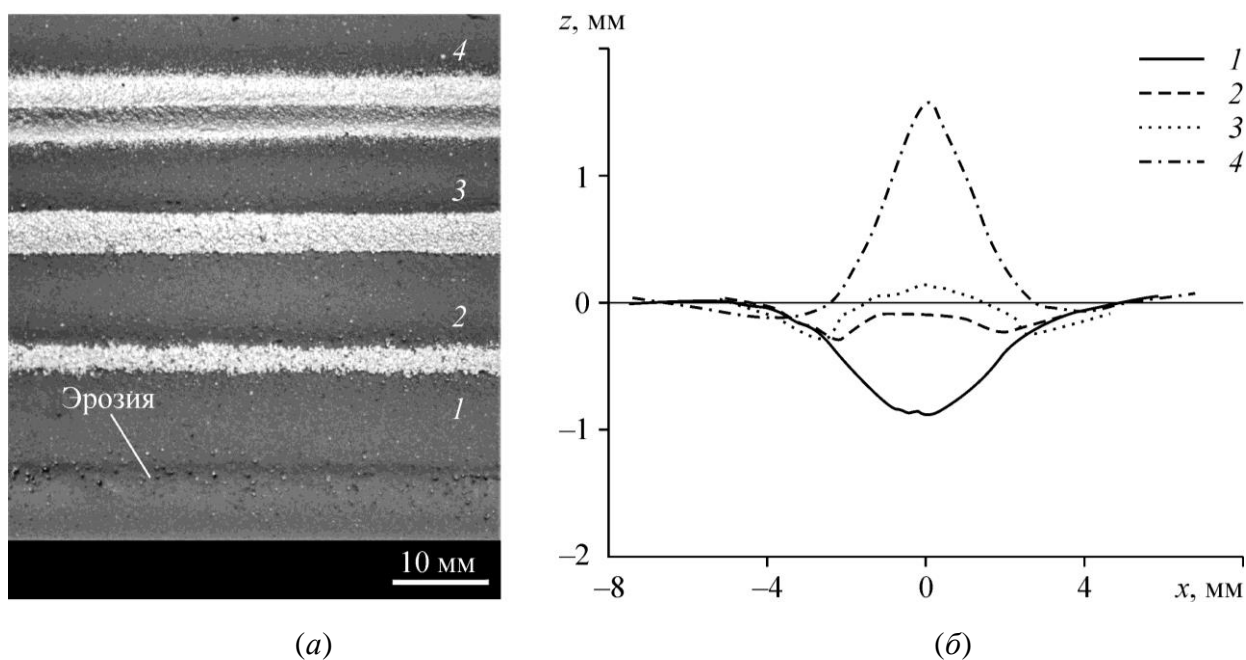


Рис. 7. Дорожки взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки (вид сверху) (а) и их усредненные профили (б), $p_0 = 0,25$ МПа.
 1 — $T_0 = 433$ К, $v_p \approx 290$ м/с, 2 — $T_0 = 473$ К, $v_p \approx 310$ м/с,
 3 — $T_0 = 523$ К, $v_p \approx 320$ м/с, 4 — $T_0 = 573$ К, $v_p \approx 330$ м/с.

На рис. 8 показаны результаты экспериментов при давлении ускоряющего воздуха в форкамере 0,5 МПа. В диапазоне температур торможения 433–523 К наблюдается эрозия подложки (рис. 8а). Максимальная глубина эрозии оказывается несколько больше 1 мм (кривые 1 и 2 на рис. 8б), т.е. подложка сильнее эродирует при более высоком давлении торможения рабочего газа, что может быть связано с более высокими скоростями частиц (в этом случае примерно на 30 м/с). Следует отметить, что при температуре 523 К одновременно с эрозией, имеющей теперь уже меньшую глубину — ~0,7 мм (кривая 3 на рис. 8б), начинают зарождаться отдельные кластеры покрытия. Сплошное покрытие формируется при температуре 573 К, дорожка покрытия высотой ~1 мм и шириной ~8 мм при этом имеет трапецевидную форму.

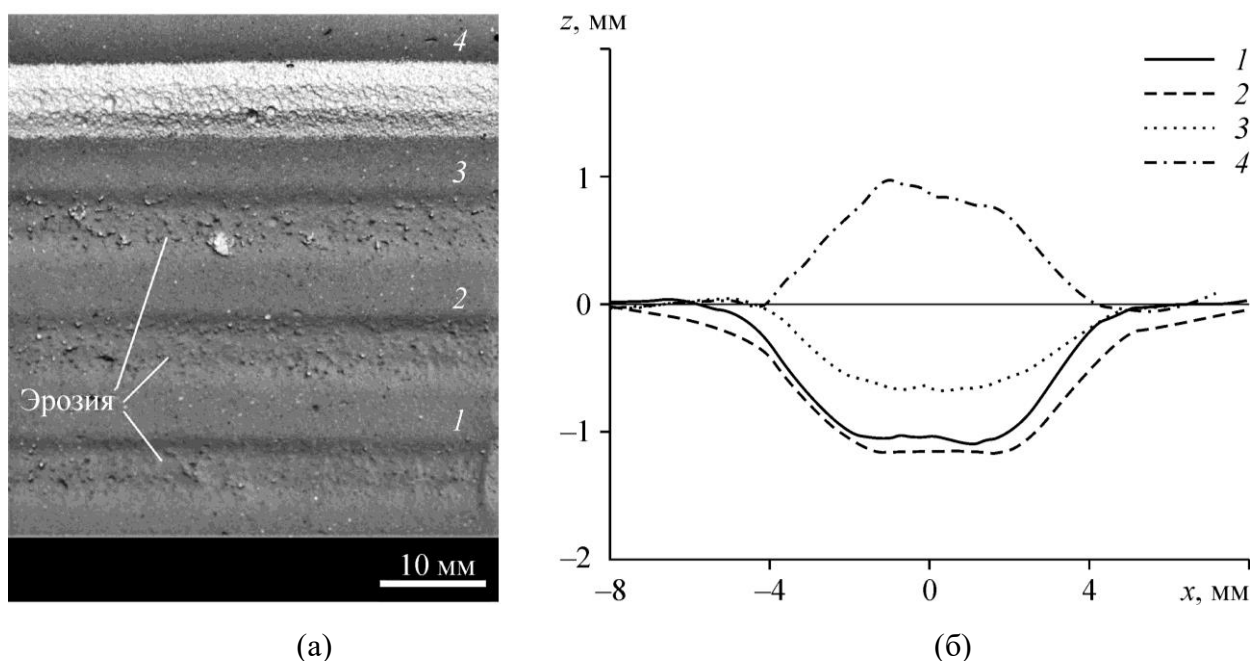


Рис. 8. Дорожки взаимодействия двухфазного потока с поверхностью подложки (вид сверху) (а) и их усредненные профили (б), $p_0 = 0,5$ МПа.
 1 — $T_0 = 433$ К, $v_p \approx 320$ м/с, 2 — $T_0 = 473$ К, $v_p \approx 340$ м/с,
 3 — $T_0 = 523$ К, $v_p \approx 360$ м/с, 4 — $T_0 = 573$ К, $v_p \approx 370$ м/с.

Во всех рассмотренных случаях с увеличением температуры торможения газа процесс эрозии подложки переходит в процесс образования покрытия. Покрытие образуется на слегка эродированной поверхности подложки, причем зона эрозии шире покрытия. Это позволяет предположить, что первые ударяющие частицы производят эрозию прежде, чем начинают

формироваться покрытие, и только после того, как поверхность подложки подвергается определенному количеству ударов частиц на единицу площади, начинает формироваться покрытие. Этот факт известен из более ранних экспериментов по напылению алюминия на стальные и медные подложки с помощью сверхзвуковых сопел. В рассматриваемом случае предварительные удары частиц приводят к заметной эрозии, чего не наблюдалось при напылении на металлические подложки. Образование покрытия начинается вблизи оси сопла (трек 2 на рис. 7а), постепенно ширина его увеличивается с ростом температуры торможения (треки 3 и 4 на рис. 7а). Это можно объяснить тем, что концентрация и скорость частиц имеют неравномерное распределение по сечению струи (с максимумом на оси сопла и постепенным падением к периферии). В тех местах, где количество предварительных ударов было недостаточным для начала формирования покрытия, остается эродированная область. После того как на поверхности подложки образуется покрытие некоторой толщины, оно начинает защищать подложку от дальнейшей эрозии.

Следует обратить внимание на тот факт, что глубина эрозии с увеличением температуры торможения рабочего газа уменьшается, несмотря на рост скорости удара частиц. Это, на первый взгляд, противоречит общеизвестной закономерности, согласно которой масса эрозии увеличивается примерно как квадрат скорости удара частиц. Можно предположить, что при ударе часть частиц закрепляется на поверхности подложки, а другая часть производит эрозию. Закрепившиеся частицы, с одной стороны, предохраняют подложку от эрозии, а с другой стороны, эта часть частиц вычитается из общего числа, так что доля частиц, которые вызывают эрозию, уменьшается. И тот и другой эффект, очевидно, будут приводить к уменьшению эрозии. Следы такого процесса видны на дорожке 3 на рис. 8а.

Согласно представленным экспериментальным данным переход к образованию покрытия при более высоком давлении торможения происходит

при более высокой температуре торможения. Температура торможения газа влияет как на скорость частиц, так и на их температуру, в то время как давление торможения влияет преимущественно только на скорость частиц. Температура торможения газа также определяет и температуру поверхности подложки. Можно предположить, что более высокие температуры частиц и подложки приводят к более благоприятным условиям для закрепления частиц и, соответственно, к меньшей эрозии в силу сделанного выше предположения. При одинаковой температуре торможения более высокому давлению торможения соответствует бóльшая эрозия в силу более высоких скоростей удара частиц. Следовательно, можно ожидать, что эрозионно-адгезионный переход при более высоком давлении торможения должен наступить при более высокой температуре торможения при условии, что скорости удара частиц лежат в благоприятном диапазоне. Если скорости частиц слишком высоки, то будет наблюдаться только эрозия, если слишком малы, то частицы не смогут закрепиться в силу недостаточной их деформации при ударе, несмотря на то, что эрозия также уменьшится.

Минимальная скорость частиц, при которой наблюдается формирование покрытия, составляет 310 м/с (при температуре торможения 473 К и давлении торможения 0,25 МПа). Однако более продуктивно процесс напыления идет при более высоких температурах торможения (573 К) и скоростях частиц 330–370 м/с, соответствующих давлениям торможения 0,25–0,5 МПа. При этих параметрах эрозия подложки оказывается также заметно ниже.

При ударе частица деформируется и возникает плотный контакт между подложкой и частицей, который длится некоторое характерное время. Одновременно в приконтактной области, где идёт интенсивная деформация частицы, её кинетическая энергия преобразуется в тепловую. На рис. 9 приведены результаты оценки максимальной температуры в приконтактной области. При ударе по стали и алюминию частицы ускорялись в сверхзвуковом сопле Лаваля, при ударе по кирпичу – в звуковом сопле.

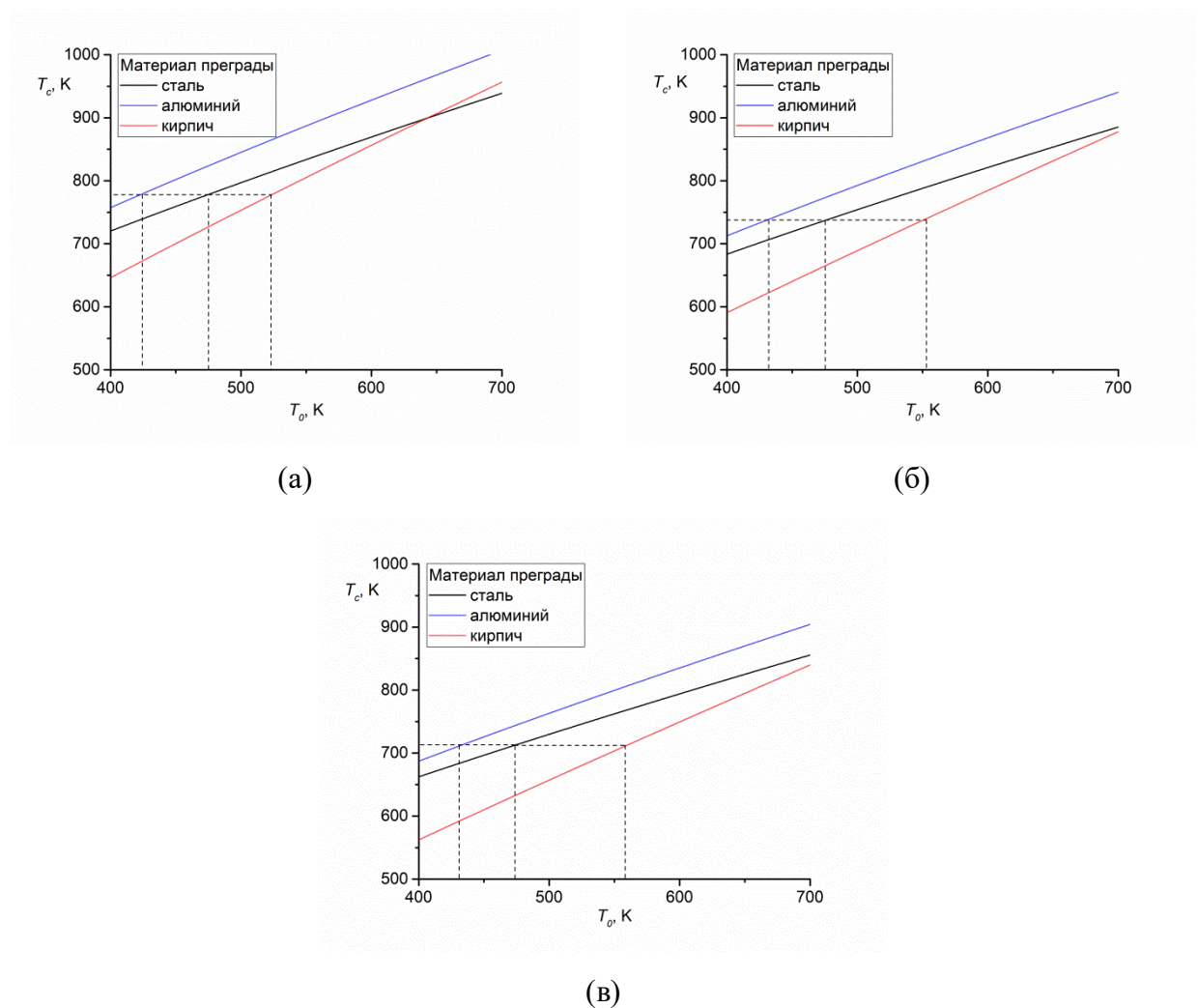


Рис. 9. Максимальная температура в приконтактной области при ударе алюминиевой частицы размером 10 мкм (а), 30 мкм (б) и 50 мкм (в) по преградам из разных материалов.

Видно, что при ускорении сверхзвуковым соплом частиц размером 30 мкм (средний размер в эксперименте) при ударе по стальной преграде при температуре торможения воздуха 470 К достигается контактная температура ~ 740 К (рис. 9б). Из ранних экспериментов известно, что при этих условиях покрытие на стали образуется, для алюминиевой преграды процесс начинается при ещё меньшей температуре газа (около 430 К). Если предположить, что закрепление частиц на кирпичной преграде начинается, когда максимальная температура в приконтактной области достигает такого же значения (~ 740 К), то видно, что это произойдёт при температуре торможения около 550 К. Экспериментально показано, что при этой температуре торможения покрытие уже формируется. Продолжая это наблюдение, можно предположить, что в формировании начального

монослоя, способствующего дальнейшему росту покрытия, участвуют частицы меньшего размера (рис. 9а).

Заключение

Проведены исследования возможностей использования эжекторных сопел для ХГН, которые показали следующее:

- показано, что положение центрального тела эжекторного сопла влияет на размеры критического сечения сопла и малейшие его перемещения вдоль оси (порядка 0,1 мм) приводят к значительным изменениям измеряемых давлений (0,1 – 0,5 МПа);

- проведены измерения скоростей алюминиевых частиц, в струях, истекающих из эжекторного сопла при различных давлениях и температурах торможения воздуха в форкамере сопла, а также сравнение со скоростями частиц, ускоряемых в осесимметричном сопле Лаваля. Показано, что существует диапазон давлений в форкамере ($3 \pm 0,2$ МПа), когда скорость частиц, ускоряемых в эжекторном сопле, достигает максимального значения.

В этом диапазоне давлений скорость частиц, ускоренных в эжекторном сопле, оказывается немного меньше (~50 м/с), чем их скорость при ускорении в сопле Лаваля при одинаковых давлениях в форкамере. Показано, что с увеличением температуры газа увеличивается и скорость частиц. Полученные данные показывают, что на скорость частиц влияет также геометрия центрального тела эжекторного сопла;

- показано, что эрозионно-адгезионный переход для разных конфигураций эжекторного сопла наблюдается примерно при одинаковой температуре торможения газа (около 520 К), несмотря на то, что скорости частиц заметно отличаются (разница более 100 м/с). При более низких температурах торможения наблюдается эрозия, причём более высоким скоростям соответствует более высокое значение коэффициента эрозии.

Проведены исследования возможностей использования звукового сопла для получения покрытий методом ХГН на эродируемом материале, которые показали следующее:

- экспериментально установлено, что скорости частиц в струях, истекающих из звукового сопла, оказываются существенно ниже (более чем на 150 м/с) скоростей частиц, ускоренных в сопле Лавалья и эжекторном сопле при высоких давлениях, что позволяет снизить эрозионное воздействие частиц на подложку;
- экспериментально установлено, что глубина эрозии с увеличением температуры торможения рабочего газа уменьшается, несмотря на рост скорости удара частиц;
- экспериментально определена критическая скорость частиц, при которой наблюдается формирование покрытия (310 м/с при температуре торможения 473 К и давлении торможения 0,25 МПа);
- проведены оценки максимальной температуры частиц в приконтактной области при ударе их о подложку из стали, алюминия и кирпича. Оценки показывают, что закрепление частиц на кирпичной преграде начинается при температуре торможения воздуха около 520 – 550 К, что согласуется с результатами экспериментов.

Цитируемая литература

1. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold spray technology. Amsterdam: Elsevier Science, 2007. 336 p.
2. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S., Jodoin B. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process // Surface & Coatings Technology. 2009. Vol. 203, No. 19. P. 2954–2960.
3. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray // Surface & Coatings Technology. 2010. Vol. 205, No. 7. P. 2167–2173.

4. Zhou X.L., Chen A.F., Liu J.C., Wu X.K., Zhang J.S. Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray // *Surface & Coatings Technology*. 2011. Vol. 206, No. 1. P. 132–136.
5. Affi J., Okazaki H., Yamada M., Fukumoto M. Fabrication of aluminum coating onto CFRP substrate by cold spray // *Materials Transactions*. 2011. Vol. 52, No. 9. P. 1759–1763.
6. Ganesan A., Yamada M., Fukumoto M. Cold spray coating deposition mechanism on the thermoplastic and thermosetting polymer substrates // *J. Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22, No. 8. P. 1275–1282.
7. Ye H., Wang J. Preparation of aluminum coating on Lexan by cold spray // *Materials Letters*. 2014. Vol. 137. P. 21–24.
8. Archambault G., Jodoin B., Gaydos S., Yandouzi M. Metallization of carbon fiber reinforced polymer composite by cold spray and lay-up molding processes // *Surface & Coatings Technology*. 2016. Vol. 300. P. 78–86.
9. Che H., Chu X., Vo P., Yue S. Metallization of various polymers by cold spray // *J. Thermal Spray Technology*. 2018. Vol. 27, No. 1–2. P. 169–178.
10. Smeltzer C.E., Gulden M.E., Compton W.A., Mechanisms of Metal Removal by Impacting Dust Particles // *J. Basic Eng.* 1970. Vol. 92, No. 3, P.639–652.
11. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Гетерогенные технологии: Проблемы взаимодействия частиц с преградой // *Теплофизика и Аэромеханика*. 2005. Т. 12, № 312, С. 387–402.

Основные публикации по результатам научно-квалификационной работы:

Публикации в рецензируемых журналах входящих в список ВАК:

1. Клинков С.В., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С., Шикалов В.С. Экспериментальное исследование холодного газодинамического напыления за маской. Часть 1 // *Теплофизика и аэромеханика*. –2016. –Т. 23 No. 5. –С. 765-770.

2. Шикалов В.С., Клинков С.В., Ряшин Н.С., Косарев В.Ф. Измерение скорости бронзовых частиц в потоке из эжекторного сопла для холодного газодинамического напыления // Сибирский физический журнал. –2017. –Т. 12 №. 4. –С. 51-54.
3. Фомин В.М., Голышев А.А., Косарев В.Ф., Маликов А.Г., Оришич А.М., Ряшин Н.С., Филиппов А.А., Шикалов В.С. Создание гетерогенных материалов на основе порошков В4С и Ni методом холодного газодинамического напыления с последующим послойным лазерным воздействием // Прикладная механика и техническая физика. –2017. –Т. 58 №. 5. –С. 218-227.
4. Шикалов В.С., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал // Теплофизика и аэромеханика. –2019. –Т. 26 №. 5. –С. 779-787.

Публикации в рецензируемых журналах:

1. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Shikalov V.S. Influence of nozzle velocity and powder feed rate on the coating mass and deposition efficiency in cold spraying // Surface and Coatings Technology. –2019. –Vol. 367. –P. 231-243.