

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
И СИСТЕМ ПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ****IMPROVING THE RELIABILITY OF FIRE-FIGHTING EQUIPMENT
AND FIRE WATER SUPPLY SYSTEMS***Криворогова А. С.^{1,2,3},**Ильиных Н. И.², кандидат физико-математических наук,**Ильиных С. А.², кандидат технических наук,**Беззапонная О. В.³, кандидат технических наук, доцент,**Гельчинский Б. Р.², доктор физико-математических наук, профессор,**Девяткин Н. О.³*

¹Судебно-экспертное учреждение
федеральной противопожарной службы
«Испытательная пожарная лаборатория»
по Свердловской области, Екатеринбург,

²Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург,

³Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург

*Krivorogova A.^{1,2,3}, Ilyinykh N.², Ilyinykh S.²,**Bezzaponnaya O.³, Gelchinski B.², Devyatkin N.³*

¹Federal State Budgetary Institution

«Forensic Expert Institution of the Federal Fire Service
«Testing Fire Laboratory» in the Sverdlovsk region», Ekaterinburg,

²Institute of Metallurgy, Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg,

³Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg

В работе предлагается решение проблемы кавитационного и гидроабразивного износа рабочих колес, корпусов и крышек пожарных насосов. С использованием программного комплекса «Plasma 2002» проведено компьютерное моделирование процесса плазменного напыления самофлюсующихся порошковых материалов Ni-Cr-V-Si-C. Представлены расчеты теплофизических и динамических процессов, имеющих место на различных стадиях плазменного напыления. Рассчитаны траектории движения частиц порошковых материалов при различных исходных данных (начальная скорость ввода и диаметр частиц порошка, координаты ввода порошка относительно оси плазматрона). Подобраны оптимальные параметры ввода частиц порошка в плазменную струю. Проведено моделирование изменения температуры в центре частиц при ее движении вдоль оси плазменной струи, исследовано изменение фронта испарения порошковых частиц в зависимости от дистанции напыления, а также моделирование структуры покрытия. Результаты моделирования были использованы при проведении плазменного напыления покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов на основе никеля на поверхности деталей пожарной техники. Представлены результаты исследований микроструктуры покрытий, полученных методом дозвукового плазменного напыления на установке «МАК 100», результаты измерения твердости и шероховатости нанесенных покрытий.

Ключевые слова: пожарное оборудование, пожарный насос, рабочее колесо, износ, кавитация, плазменное напыление, микроструктура покрытий, шероховатость, твердость

The paper proposes a solution to the problem of cavitation and waterjet wear of impellers, housings and covers of fire pumps. Computer simulation of the plasma spraying process of self-fluxing powder materials Ni-Cr-B-Si-C was carried out using the Plasma 2002 software package. Calculations of thermophysical and dynamic processes taking place at various stages of plasma spraying are presented. The trajectories of movement of particles of powder materials are calculated for different initial data (initial input velocity and diameter of powder particles, coordinates of powder input relative to the axis of the plasmatron). The optimal parameters for entering powder particles into the plasma jet have been selected. A simulation of the temperature change in the center of the particles during its movement along the axis of the plasma jet is carried out, the change in the evaporation front of powder particles depending on the spraying distance is investigated, as well as modeling of the coating structure. The simulation results were used for plasma spraying of coatings made of nickel-based self-fluxing powder materials on the surface of fire equipment parts. The results of studies of the microstructure of coatings obtained by subsonic plasma spraying on the "MAC 100" installation, the results of measuring the hardness and roughness of the applied coatings are presented.

Keywords: fire equipment, fire pump, impeller, wear, cavitation, plasma spraying, microstructure of coatings, roughness, hardness

Введение

В настоящее время детали и механизмы, используемые для изготовления пожарного оборудования, в частности пожарных насосов, выполняются из алюминиевых сплавов, поскольку алюминий легкий, прочный и не дорогой материал. Сплавы алюминия хорошо зарекомендовали себя как надежные материалы, устойчивые к коррозии, однако по механическим характеристикам, связанным с износостойкостью, они сильно уступают стальным, чугунным или медным материалам.

Одним из основных элементов пожарного насоса является рабочее колесо. В пожарных насосах на ступенях нормального давления рабочее колесо представляет собой крыльчатку закрытого типа с лопатками и перепускными отверстиями. Крыльчатка, корпус, а также крышка насоса изготавливаются из алюминиевого сплава АК7ч (АЛ9). С помощью рабочего колеса происходит преобразование кинетической энергии вращения вала в энергию жидкостного потока. Из-за износа лопастей крыльчатки снижается напор подаваемой жидкости. Кроме этого, износ лопа-

стей может привести к разбалансировке системы, что приводит к увеличению нагрузки на подшипники. Вследствие этого может произойти смещение расположения крыльчатки относительно вала, что в дальнейшем приведет к неисправности (отказу) насосной установки [1–4].

Повреждения возникают из-за сложных условий работы насосного агрегата: агрессивных сред (например, раствор пенообразователя); использование воды из открытых водоемов; работа в климатических условиях с резкими перепадами температур; работы насоса при перекрытом рукавном оборудовании, в этом случае насос, продолжая работать, нагревает воду в корпусе; работы «в сухую»; неправильная посадка и установка деталей насоса (не выдержаны размеры и допуски); несвоевременное и некачественное проведение технического обслуживания специалистами (водителями), осуществляющими управление техникой и личным составом дежурных смен [2].

Основными причинами, вызывающими износ поверхностей деталей пожарных насосов, являются кавитация и влия-

ние абразивных частиц, поступающих вместе с жидкостью. На рис. 1, 2 показаны повреждения, вызванные гидроабразивными и кавитационными явлениями [2, 3].



Рисунок 1. Рабочее колесо со следами абразивного и кавитационного износа



Рисунок 2. Лопастей рабочего колеса пожарного насоса с явными признаками кавитационного износа

Кавитация приводит к тому, что с поверхностей деталей пожарных насосов отбиваются твердые кусочки и поверхность становится испещренной небольшими отверстиями, в которые впоследствии забивается грязь, что и приводит к снижению механической прочности деталей пожарных насосов. При этом выбитые абразивные частички, вместе с частицами,

поступающими извне, способствуют усилению кавитации и изнашивают поверхность еще сильнее [5, 6].

Полностью защитить поверхности пожарного оборудования от изнашивания, конечно, невозможно, но можно замедлить этот процесс благодаря своевременному техническому обслуживанию агрегатов

насосного оборудования и работе в рациональных режимах. Уменьшить влияние гидроабразивных и кавитационных воздействий на поверхности деталей пожарного оборудования можно с помощью нанесения на изнашиваемые поверхности покрытий, которые по своим механическим свойствам будут превосходить свойства материала, из которого изготавливаются детали пожарных насосов [7]. С помощью метода плазменного напыления наносятся покрытия из самофлюсующихся порошков на никелевой основе. Такой способ нанесения покрытий поможет снизить влияние кавитационных явлений и уменьшить их абразивный износ от частиц песка и грязи, попадающих в насос из открытых водных источников и пожарных гидрантов.

Повышение износостойкости и увеличение сроков эксплуатации деталей пожарной техники с применением передовых технологий обработки поверхностей деталей пожарного оборудования являются важными задачами для исследователей [8].

Газотермические методы нанесения покрытий, среди которых наибольшее распространение получило плазменное порошковое напыление [9–13], широко используются для реновации поверхностей изношенных деталей. Эти методы обеспечивают высокую производительность и универсальность, а также широкий спектр свойств покрытий. Для восстановления изношенных поверхностей напылением и напылением с оплавлением используются порошковые самофлюсующиеся материалы на основе никеля, в частности самофлюсующиеся сплавы системы Ni-Cr-B-Si-C [8–17].

Таким образом, целью данной работы является изучение возможности использования плазменного напыления для увеличения срока службы деталей пожарной техники (рабочее колесо), работающих в условиях гидроабразивного износа.

Проведение экспериментальных исследований по разработке оптимальных режимов нанесения покрытий связано со

значительными временными, финансовыми и материальными затратами, что обусловлено высокой стоимостью порошковых материалов, а также технологического и исследовательского оборудования. Эти затраты можно существенно минимизировать с помощью современных методов компьютерного моделирования, которые позволяют исследовать как физико-химические свойства исследуемых материалов в широком интервале температур и давлений, так и процессы, происходящие при нанесении покрытий методом плазменного напыления, прогнозировать свойства получаемых покрытий, определять необходимые технологические режимы нанесения материалов [16, 18–26].

Задачи исследования: оптимизация технологических режимов плазменного напыления порошковых материалов системы Ni-Cr-B-Si-C на детали пожарного оборудования методом компьютерного моделирования, нанесение покрытий на образцы алюминиевого сплава АК7ч, исследование физико-механических свойств получаемых покрытий.

Методика исследования

В настоящей работе с использованием программного комплекса «Plasma 2002» [22–23] проведены расчеты теплофизических и динамических процессов, имеющих место на различных стадиях плазменного напыления покрытий порошковых самофлюсующихся материалов Ni-0.5C-15Cr-3.2Si-2B (ПГСП-2) и Ni-1C-17Cr-4.1Si-3.6B (ПГСП-4).

Программный комплекс «Plasma 2002» [22–23] предназначен для проведения моделирования динамических и теплофизических процессов, происходящих на различных стадиях процесса плазменного напыления покрытий. Данное программное обеспечение позволяет моделировать весь процесс формирования покрытия: движение и нагрев частиц порошка в плазменной струе, формирование структуры покрытия, теплообмен и напряженно-деформированное состояние системы покрытие-подложка (рис. 3).

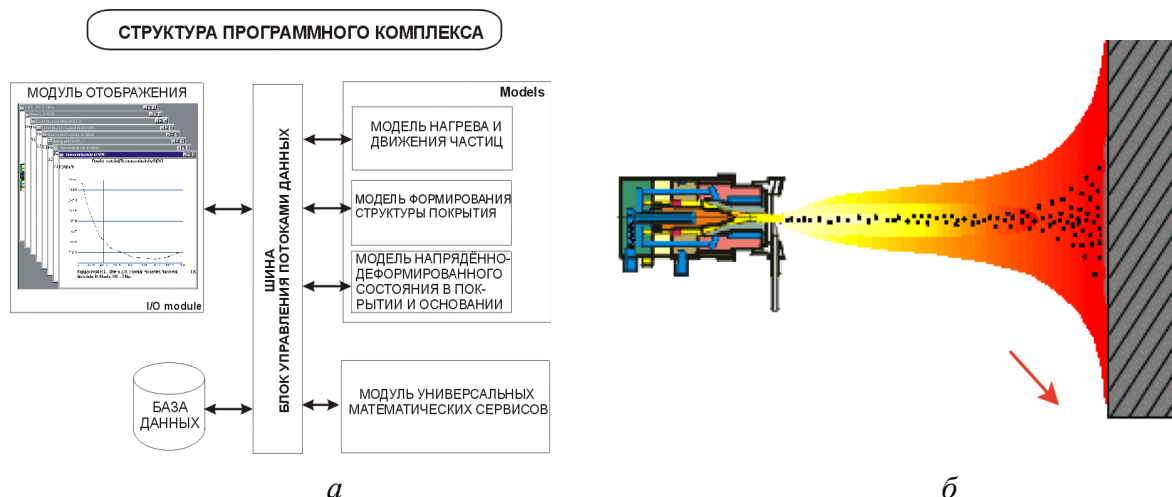


Рисунок 3. Структура программного комплекса «Plasma 2002» (а), процесс моделирования плазменного напыления (б)

Параметры ввода порошка в плазменную струю подбираются таким образом, чтобы траектория частицы (рис. 4) пересекала ось струи плазматрона и долетала

до подложки, не испаряясь и минимально теряя в диаметре.

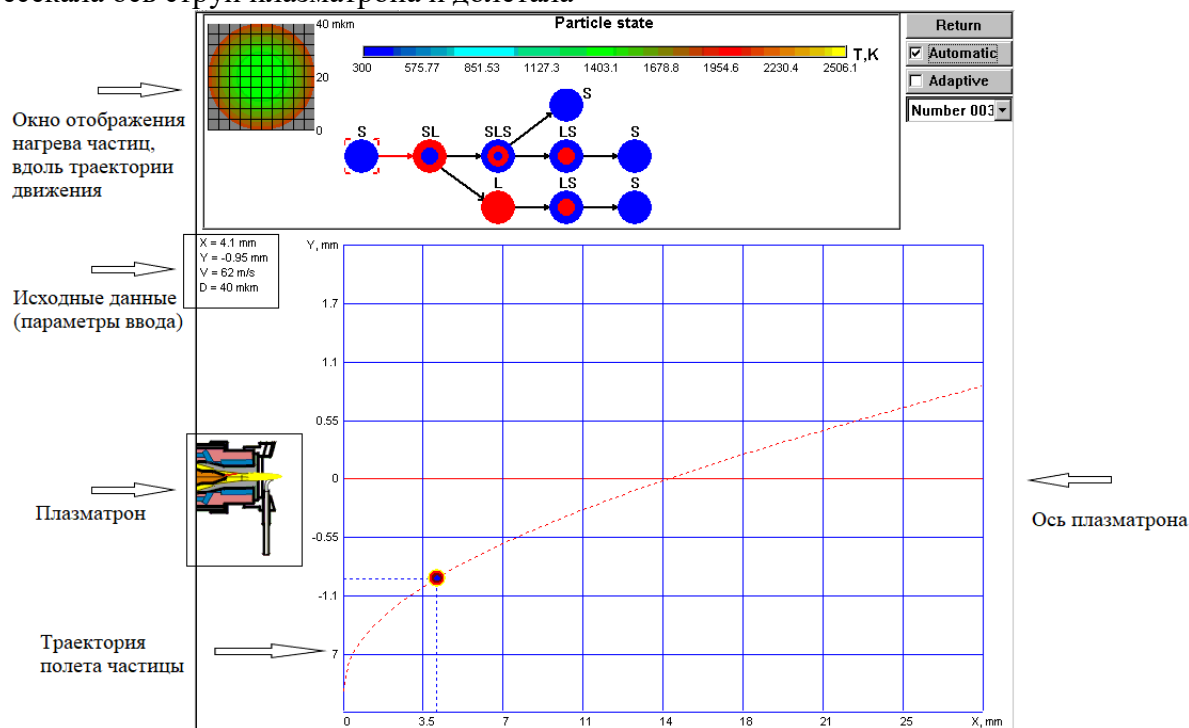


Рисунок 4. Окно просмотра состояния частицы

Исходные данные для моделирования: плазмообразующий газ – воздух; начальный диаметр частиц 40, 60, 80 мкм; начальная скорость 3–9,5 м/с; дистанция напыления – 200 мм; время напыления 5 с; время охлаждения 30 с.

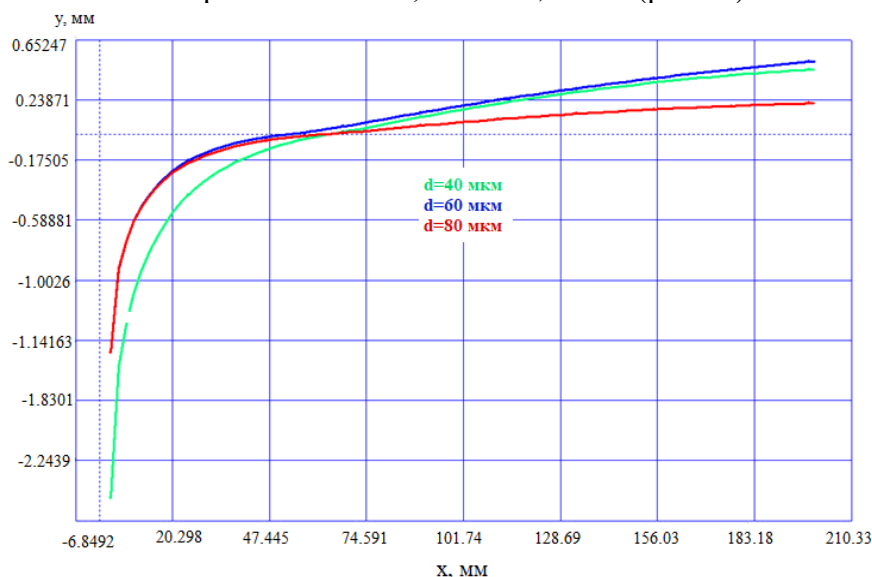
Моделирование движения частиц порошковых материалов ПГСП-2 и ПГСП-4 в плазменной струе

Рассчитаны траектории движения частиц порошковых материалов при различных исходных данных (начальная скорость ввода, координаты ввода порошка

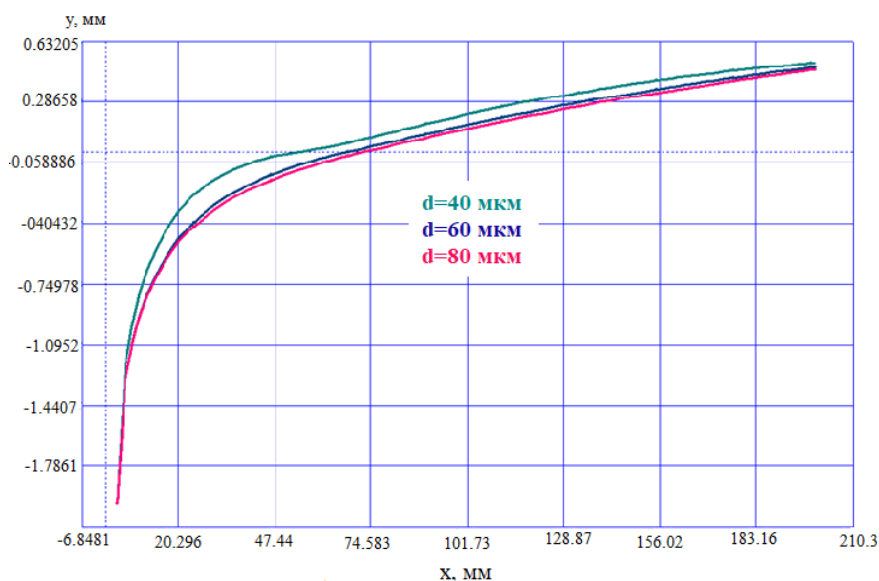
относительно оси плазмотрона, диаметр частиц). Результаты моделирования представлены на рис. 5. Подобраны оптимальные параметры ввода частиц порошка в плазменную струю.

Для частиц порошкового материала ПГСР-2 фракции 40 мкм оптимальная скорость ввода $v = 9,5$ м/с, координаты ввода относительно оси плазмотрона $x = 3$ мм,

$y = -2,5$ мм; для частиц фракции 60 мкм $v = 4,52$ м/с, $x = 3$ мм, $y = -1,5$ мм; для частиц фракции 80 мкм $v = 3,27$ м/с, $x = 3$ мм, $y = -1,5$ мм (рис. 5а). Для порошкового материала ПГСР-4 оптимальная скорость ввода частиц фракции 40 мкм составляет $v = 8,45$ м/с, для частиц фракции 60 мкм $v = 5,2$ м/с, для частиц фракции 80 мкм $v = 3,75$ м/с (рис.5б).



а



б

Рисунок 5. Траектории движения частиц порошковых материалов 40 мкм, 60 мкм, 80 мкм: а – ПГСР-2, б – ПГСР-4

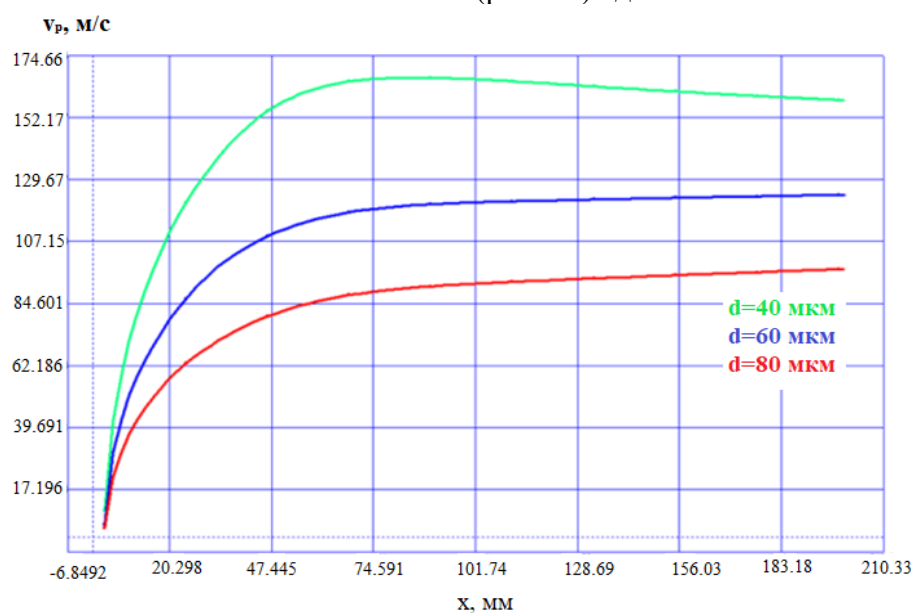
Отклонение частиц от осевого движения обусловлено следующими факторами: радиальной скоростью компонентов окружающего газа; вращательной составляющей, обусловленной особенностью

плазменного разряда в плазмотроне, начальным импульсом частиц. При приближении к оси плазменной струи, за счет повышения температуры, вязкость газа

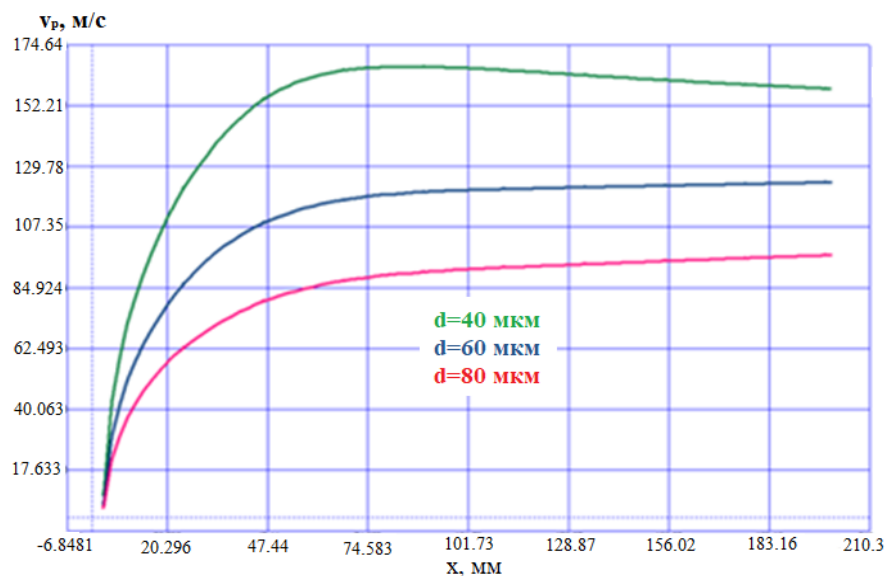
увеличивается, соответственно, увеличивается сила лобового сопротивления. Создается барьер, который может быть преодолен частицами с большим диаметром, имеющими большую инерционность. Частицы с меньшим диаметром не могут преодолеть осевую линию плазменного факела и не достигают высокотемпературных и высокоскоростных участков струи, для них характерно движение по периферии плазменного потока. Время нахождения их

в струе больше, поэтому они могут достигать больших скоростей и нагреваться до более высоких температур.

При вводе частиц порошка в плазменную струю происходит их ускорение. Скорость частиц меньшего диаметра выше за счет их малой инерционности и, соответственно, более крупные частицы летят с меньшими скоростями. На рис. 6 представлено изменение скорости частиц порошковых материалов ПГСР-2 (рис. 6а) и ПГСР-4 (рис. 6б) вдоль оси плазменной струи.



а



б

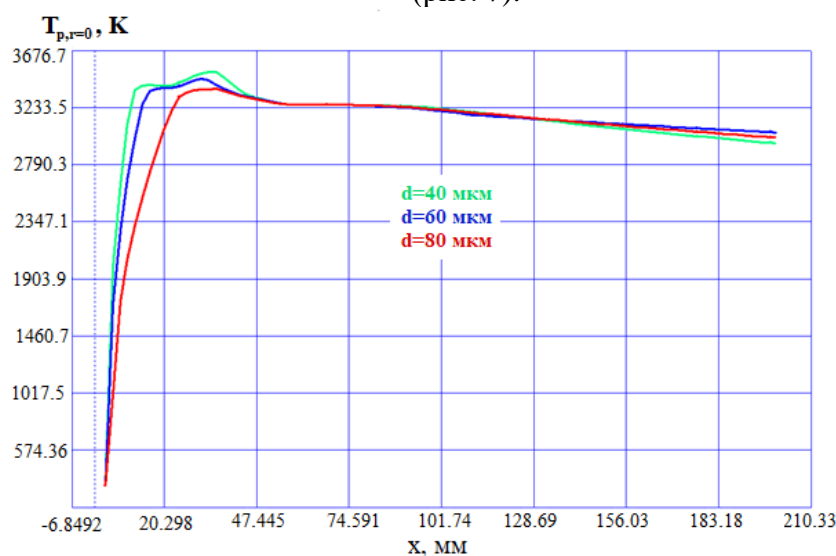
Рисунок 6. Изменение скорости частиц порошка вдоль оси плазменной струи:
а – ПГСР-2; б – ПГСР-4

Частицы порошка ПГСР-2 диаметром 40 мкм достигают максимальной скорости 170 м/с на дистанции 70–90 мм; частицы диаметром 60 мкм и 80 мкм максимально ускоряются в конце дистанции. Скорости частиц в момент соударения с подложкой составляют 160 м/с для частиц диаметром 40 мкм, 126 м/с для частиц диаметром 60 мкм и 97 м/с у частиц диаметром 80 мкм. Частицы порошка ПГСР-4 диаметром 40 мкм достигают максимальной скорости 170 м/с на расстоянии 80–90 мм от среза сопла плазмотрона. Частицы диамет-

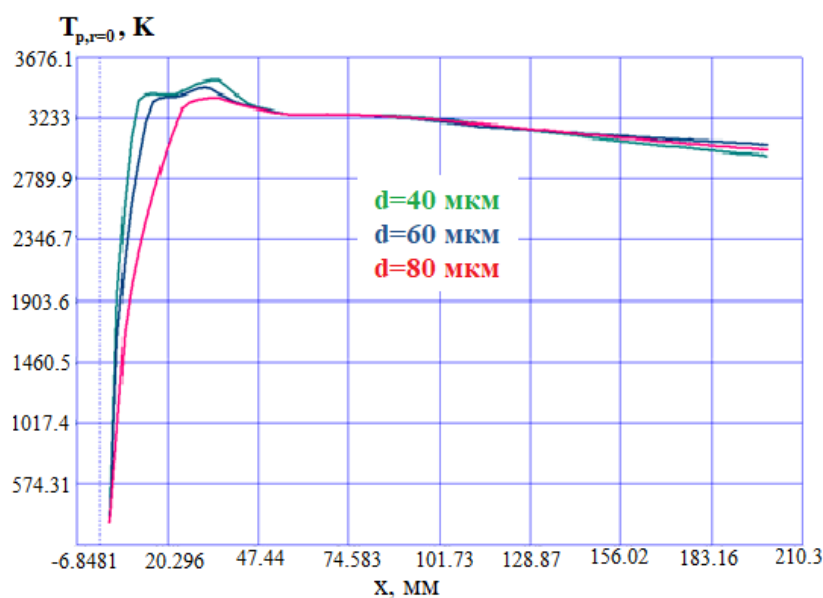
ром 60 мкм и 80 мкм достигают максимальной скорости в конце дистанции. Скорости частиц в момент соударения с подложкой составляют 160 м/с для частиц диаметром 40 мкм, 125 м/с для частиц диаметром 60 мкм и 98 м/с у частиц диаметром 80 мкм.

Моделирование нагрева частиц порошковых материалов ПГСР-2 и ПГСР-4 в плазменной струе

Проведено моделирование изменения температуры в центре частиц при ее движении вдоль оси плазменной струи (рис. 7).



а



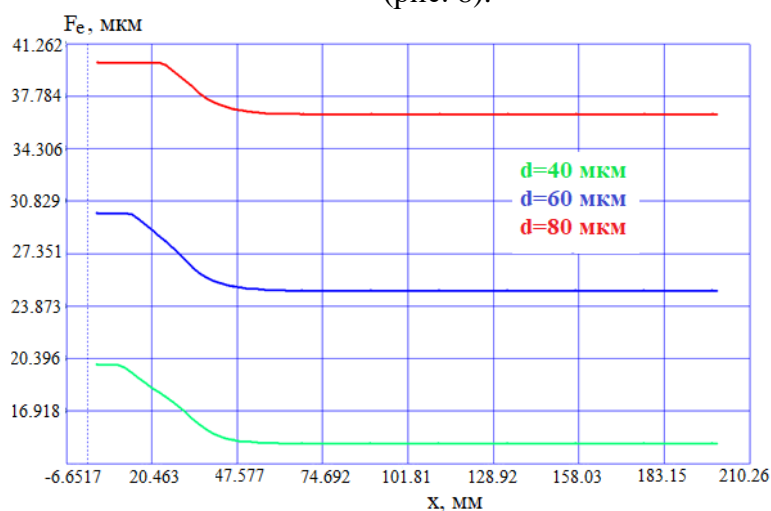
б

Рисунок 7. Изменение температуры в центре частиц порошка вдоль оси плазменной струи: а – ПГСР-2; б – ПГСР-4

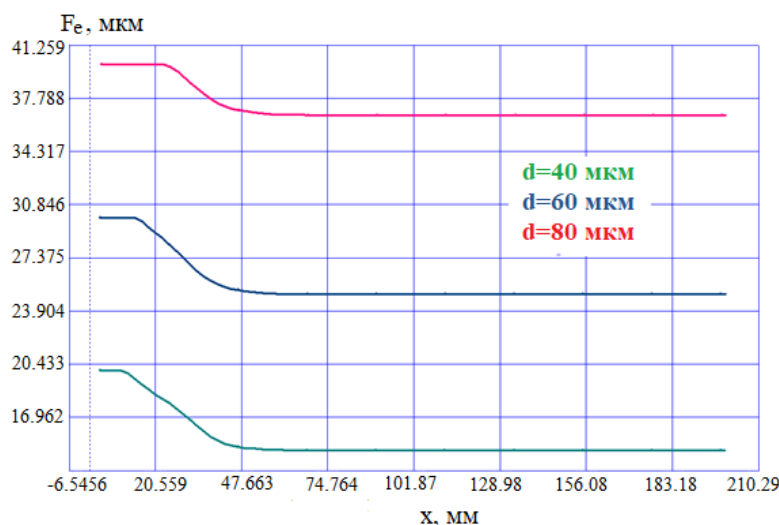
Частицы порошка ПГСР-2 различных фракций прогреваются до температуры плавления ($T_{пл} \approx 1050$ °С) на дистанции 8–12 мм, температура кипения достигается на участке 15–30 мм от среза сопла. Температура плавления частиц порошкового материала ПГСР-4 ($T_{пл} = 950$ °С) достигается на расстоянии 8–10 мм от среза сопла плазмотрона, температура кипения –

на участке 15–30 мм. При дальнейшем движении частица начинает охлаждаться вследствие уменьшения температуры плазменной струи.

Проведено исследование изменения фронта испарения (F_e) порошковых частиц в зависимости от дистанции напыления. Показано, что вследствие испарения происходит уменьшение диаметра частиц (рис. 8).



а



б

Рисунок 8. Динамика фронта испарения частиц порошковых материалов:
а – ПГСР-2; б – ПГСР-4

Частицы диаметром 40 мкм теряют до 25 % от первоначального размера (для обоих порошков), частицы диаметром 60 мкм – до 15 % (ПГСР-2) и 17 % (ПГСР-4), а частицы диаметром 80 мкм – до 9 % (ПГСР-2) и 8 % (ПГСР-4).

Моделирование структуры покрытия

Моделирование структуры покрытия показывает, что при различных диа-

метрах частиц получают различные топологии поверхностей и пористости полученных покрытий. Программный комплекс «Plasma 2002» позволяет смоделировать слои покрытия при каждом проходе плазменной струи. В качестве примера на рис.

9 представлены структуры покрытий, полученных из ПГСР-2 (рис. 9а) и ПГСР-4 (рис. 9б), диаметр частиц порошка 30–50 мкм.

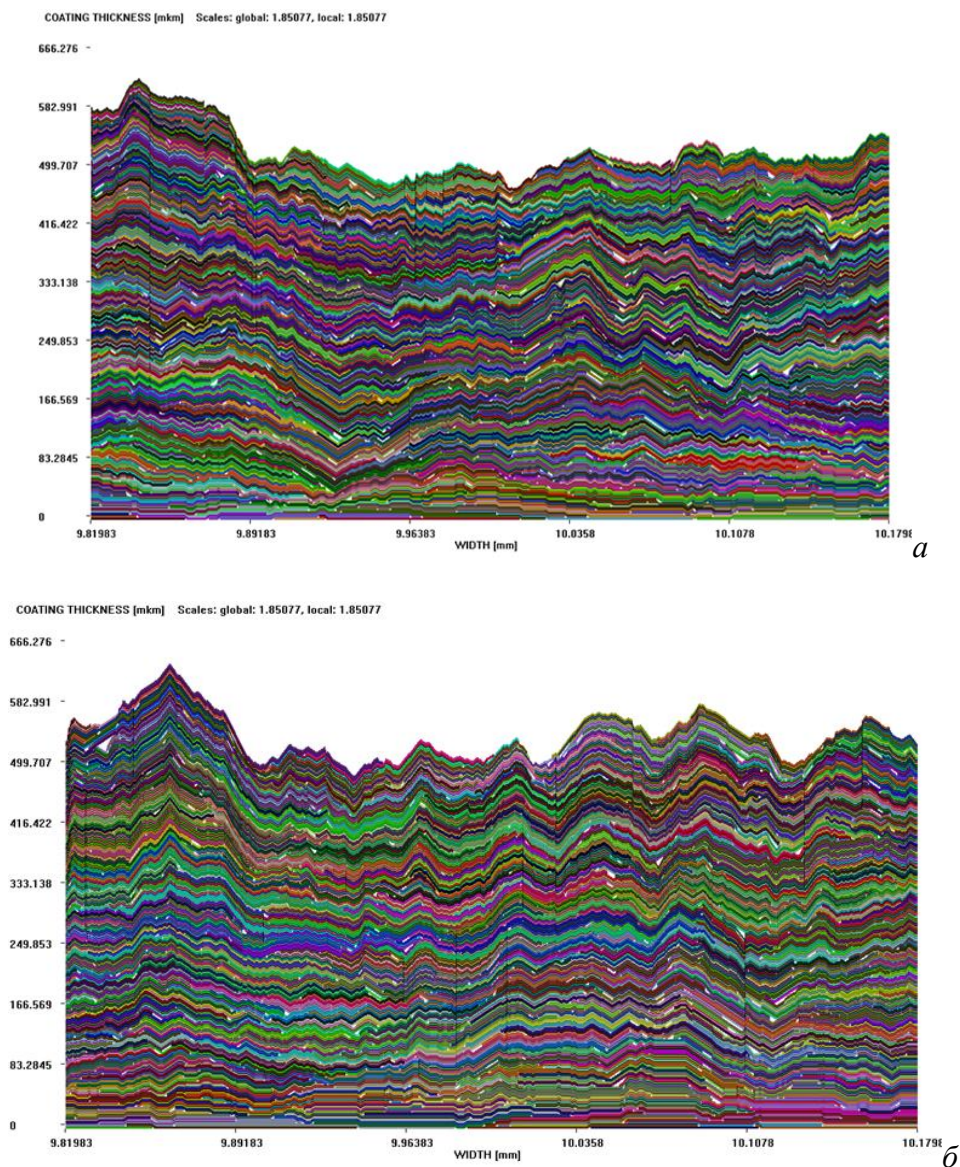


Рисунок 9. Структура покрытия ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б). Диаметр частиц порошка 30–50 мкм

Показано, что пористость покрытий, полученных при нанесении ПГСР-2 на подложку, изменяется от 2,9 % до 7,5 %, а шероховатость R_{\max} – от 140 до 166 мкм при изменении диаметра частиц порошка ПГСР-2 от (30–50) до (70–90) мкм. Для ПГСР-4 изменения пористости и шероховатости R_{\max} составляют 2,6–7,3 %

и 66 – 120 мкм соответственно. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование порошковых материалов с меньшим диаметром позволяет получить покрытия с более низкими значениями пористости и шероховатости.

Полученные данные были использованы для проведения лабораторного эксперимента.

Лабораторный эксперимент по нанесению и исследованию покрытий

Покрытия из самофлюсующихся порошков на основе никеля ПГСР-2 и ПГСР-4 напылялись на установке «МАК-

100» дозвуковым плазмотроном при следующих параметрах: состав плазмообразующего газа – 90 % воздух + 10 % пропан, рабочий ток 150 А, напряжение 300 В, давление газа 0,4 МПа, расстояние до образца 300 мм, скорость плазменного потока 250–300 м/с. Микроструктура полученных покрытий представлена на рис. 10.

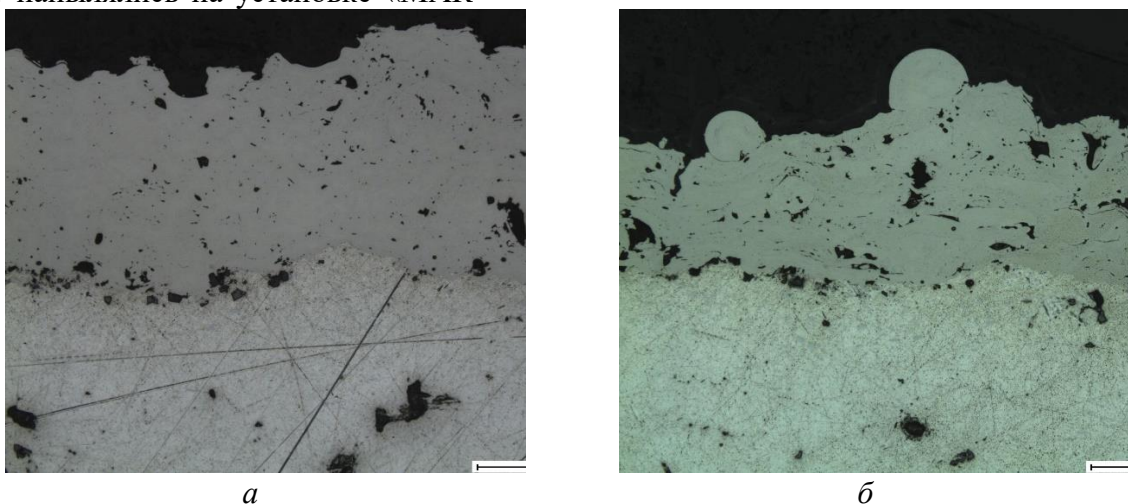


Рисунок 10. Микроструктура покрытий ПГСР-2 (а) и ПГСР-4 (б), полученных с помощью дозвукового плазменного напыления на подложку из алюминиевого сплава

Микроструктура покрытия ПГСР-2 представлена на рис 10а. Важнейшей особенностью структур, получаемых при плазменном напылении, является высокая степень дисперсности, которая определяет комплекс эксплуатационных характеристик. Покрытие характеризуется низкой пористостью и высокой плотностью. Поры малы, расположены далеко друг от друга, вероятно образование этих пор обусловлено дегазацией расплавленного материала порошинок во время их кристаллизации. Оксидные пленки тонкие, располагаются вдоль границ раздела основы с покрытием, что говорит о «выгорании частиц порошка».

Микроструктура покрытия ПГСР-4 представлена на рис. 10б. Покрытие характеризуется высокой плотностью и наличием пор по всей толщине. Поры имеют неправильную форму и размеры от нескольких микрон до 40 мкм. Участок

покрытия на границе с подложкой характеризуется равномерной структурой.

У покрытий ПГСР-2 и ПГСР-4 на границе покрытие – подложка частицы порошка достаточно проплавлены, покрытия имеют слоистую структуру с хорошо деформированными частицами по всему телу покрытия. Поры имеют как округлую, так и вытянутую форму. Линия сплавления с подложкой достаточно ровная и плотная.

Для определения прочностных характеристик полученных покрытий, а также косвенной оценки их эксплуатационных свойств была измерена **твердость по Роквеллу**. Измерение твердости проводили ультразвуковым измерителем УЗИТ-3 (пределы измерения от 20–70 HRC, погрешность измерения не более $\pm 2,0$ HRC). Твердость сплава АЛ-9 измерялась на цилиндрических образцах диаметром $D = 30$ мм, высотой $H = 16$ мм и составила 29,1

HRC. Результаты измерения твердости покрытий на образцах ПГСП-2 и ПГСП-4 представлены в табл.1.

Таблица 1
Значения твердости покрытий, HRC

№ замера Материал	1	2	3	4	5	6	7	8
ПГСП-2	54,6	58,9	53,9	59,1	61,3	58,6	55,1	54,0
ПГСП-4	71,1	64,5	65,8	69,4	62,3	65,0	62,5	66,9

Разброс значений твердости связан с особенностями строения покрытия, его слоистой структурой, а также с многофазностью нанесенного многокомпонентного материала, в котором содержатся области с разной твердостью. Измерения твердости по Роквеллу дают усредненную картину твердости в направлении, перпендикулярном плоскости слоя.

Шероховатость покрытий оценивали с использованием профилометра TR-200, который применяется для контроля поверхностей металлических и неметаллических изделий, различных машиностроительных деталей в условиях производства, цехах, в лабораториях, метрологических, научно-исследовательских центрах. Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2
Значения шероховатости поверхностей покрытий ПГСП- 2 и ПГСП-4, полученных с помощью дозвукового плазменного напыления

№ образец	Порошок	Кол. шт.	Шероховатость, Ra	Шероховатость, Rz
1	ПГСП-2	1	5,87	29,39
1,1		1	5,42	28,1
2	ПГСП-4	1	6,32	25,04
2,1		1	7,94	31,85

Выводы

Анализ результатов моделирования показывает, что скорости движения частиц и температура их нагрева зависят от траектории движения частицы в плазменной струе, площади поверхности частицы и ее массы, а также времени нахождения частицы в плазменной струе. Начальная скорость ввода частицы в плазменную струю существенно влияет на температуру, скорость и время пребывания частицы в струе. Моделирование позволяет оптимизировать траекторию полета частиц до столкновения с основанием. Методом подбора начальных параметров задается движение частицы в центральной зоне плазменной

струи для получения максимального ускорения и теплового воздействия.

В результате моделирования были подобраны параметры технологии нанесения частиц методом плазменного напыления.

Для порошкового материала ПГСП-2:

– для фракции 40 мкм оптимальная скорость ввода составила $v = 9,50$ м/с, координаты ввода относительно оси плазматрона $x = 3$ мм, $y = -2,5$ мм;

– для частиц фракции 60 мкм: $v = 4,52$ м/с, $x = 3$ мм, $y = -1,5$ мм;

– для частиц фракции 80 мкм: $v = 3,27$ м/с, $x = 3$ мм, $y = -1,5$ мм.

Для порошкового материала ПГСП-4:

- для фракции 40 мкм оптимальная скорость ввода составила $v = 8,45$ м/с, координаты ввода относительно оси плазмотрона $x = 3$ мм, $y = -2,5$ мм;
- для частиц фракции 60 мкм: $v = 5,2$ м/с, $x = 3$ мм, $y = -1,5$ мм;
- для частиц фракции 80 мкм: $v = 3,75$ м/с, $x = 3$ мм, $y = -1,5$ мм.

При данных параметрах ввода порошкового материала в плазменную струю частицы порошка достигают следующих максимальных скоростей:

- частицы порошка ПГСП-2 диаметром 40 мкм достигают максимальной скорости 170 м/с на дистанции 70–90 мм; частицы диаметром 60 мкм и 80 мкм максимально ускоряются в конце дистанции. Скорости частиц в момент соударения с подложкой составляют 160 м/с для частиц диаметром 40 мкм, 126 м/с для частиц диаметром 60 мкм и 97 м/с у частиц диаметром 80 мкм;
- частицы порошка ПГСП-4 диаметром 40 мкм достигают максимальной скорости 170 м/с на расстоянии 80–90 мм от среза сопла плазмотрона. Частицы диаметром 60 мкм и 80 мкм достигают максимальной скорости в конце дистанции. Скорости частиц в момент соударения с подложкой составляют 160 м/с для частиц диаметром 40 мкм, 125 м/с для частиц диаметром 60 мкм и 98 м/с у частиц диаметром 80 мкм.

Моделирование структуры покрытия показывает, что пористость покрытий, полученных при нанесении ПГСП-2 на подложку, изменяется от 2,9% до 7,5%, а шероховатость R_{\max} – от 140 до 166 мкм при изменении диаметра частиц порошка ПГСП-2 от (30–50) до (70–90) мкм, а пористость покрытий ПГСП-4 изменяется от 2,6

до 7,3 %, шероховатость R_{\max} составляет и 66 – 120 мкм.

Результаты компьютерного эксперимента были использованы при выборе параметров для нанесения покрытий методом дозвукового плазменного напыления.

Исследования покрытий в реальном эксперименте показали хорошую сходимость с результатами компьютерного моделирования. По данным микроструктуры образцов видно, что покрытия ПГСП-2 и ПГСП-4 характеризуются низкой пористостью и высокой плотностью, а также слоистой структурой с хорошо деформированными частицами по всему объему покрытия. Поры имеют как округлую, так и вытянутую формы. Линия сплавления с подложкой довольно ровная и плотная.

Результаты измерения твердости по Роквеллу показали, что твердость образцов с покрытием более чем в два раза превышает твердость алюминиевого сплава АЛ-9. Средние значения твердости для покрытия ПГСП-2 составили 57,6 НРС, для покрытия ПГСП-4 – 65,9 НРС. При этом значение твердости сплава АЛ-9 составило 29,1 НРС.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что покрытия из порошковых самофлюсующихся материалов, нанесенные на детали пожарного оборудования, существенно улучшают поверхностные свойства деталей и механизмов пожарной техники, в частности, рабочего колеса и корпуса пожарного насоса. Использование данных покрытий приводит к уменьшению воздействия кавитации на корпус деталей, а также повышению износостойкости крыльчатки пожарного насоса, что, в свою очередь, способствует продлению срока службы пожарного оборудования и применению его при высоких температурах пожара.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-21-00063_Росатом

Литература

1. Фарберов В. Я, Миськевич Л. В., Родионов П. В. Первоначальная подготовка пожарных-спасателей. 2-е изд., испр. и доп. Юрга, 2015. 387 с.
2. Пожарные автомобили. СПб., 2006. 507 с.
3. Пожарная и аварийно-спасательная техника / М. Д. Безбородько и др. М., 2011.
4. Кривоорогова А. С. и др. Использование гидрофобных пропиток, нанесенных на плазмонапыленные поверхности деталей пожарной техники // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: сборник материалов Дней науки (26–28 октября 2022 г.): в 2 ч. Екатеринбург, 2022. Ч. 1. С. 96–100.
5. Эркабаева Е. О., Чешун Ю. А. Кавитация в центробежных насосах // Актуальные проблемы энергетики – 2018: материалы студ. науч.-техн. конф. Минск, 2018. С. 620–621.
6. Кривоорогова А. С., Беззапонная О. В. Исследование физико-химических свойств самофлюсующего порошка на основе никеля, используемого для упрочнения поверхностей деталей пожарно-технического вооружения // Техносферная безопасность. 2019. № 2 (23).
7. Ilinykh N. et al. Thermodynamic modeling of composition and properties of self-fluxing materials based on the nickel // MATEC Web of Conferences. 2020. 329 (6) 02026. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032902026>.
8. Гельчинский Б. Р. и др. Способ получения защитного покрытия: патент на изобретение 2741040 С1, 22.01.2021.
9. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М., 1985. 240 с.
10. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. М., 1977. 184 с.
11. R. C. Tucker, Jr. Introduction to Coating Design and Processing // ASM Handbook. 1994. Vol. 5. Pp. 497–509.
12. Тушинский Л. И., Плохов А. В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск, 1986. 199 с.
13. Zimoglyadova T. A. et al. Structure and Properties of Functional Self-Fluxing Nickel-Containing Coatings Obtained by Non-Vacuum Electron-Beam Cladding // Metal Science and Heat Treatment. 2019. Vol. 60, No 9-10 633–40. DOI: 10.1007/s11041-019-00330-4.
14. Simunovic K. et al. Modeling and Optimization in Investigating Thermally Sprayed Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings: A Review, Materials. 2020. Vol. 13, No 20. 4584. <https://doi.org/10.3390/ma13204584>.
15. Hemmati I. et al. Microstructure and Phase Formation in a Rapidly Solidified Laser Deposited Ni-Cr-B-Si-C Hardfacing Alloy // Metallurgical and materials transactions. 2014. Vol. 45A. Pp. 878–892.
16. Ilinykh N. et al. Thermodynamic modeling of composition and properties of self-fluxing materials based on the nickel // MATEC Web of Conferences. 329(2020) 02026. DOI: 10.1051/mateconf/202032902026.
17. Мухин В. С., Шехтман С. Р. Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 1 (19). С. 84–91.
18. Vatolin N. A., Moiseev G. K., Trusov B. G. Thermodynamic modeling in the high-temperature inorganic systems. М., 1994.
19. Trusov B. G. Programmatic system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie. 2012. Pp. 240–249.
20. Belov G. V., Trusov B. G. Thermodynamic modeling of chemically reacting systems. М., 2013.
21. Kundas S. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes // Journal of advanced materials. 2000. Vol. 32, № 3. P. 3–11.
22. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Кашко Т. А. Компьютерное моделирование технологических процессов: доклады БГУИР. 2004. 3. С. 38–49.
23. Kundas S., Piyuschenko A. Computer simulation and control of plasma spraying processes // Materials and Manufacturing Processes. 2006. Vol. 17, Issue 1. Pp. 85–96. DOI 10.1081/AMP-120002799.
24. He-Ping Li, E. Pfende. Three Dimensional Modeling of the Plasma Spray Process // Journal of Thermal Spray Technology. 2007. Vol. 16 (2). Pp. 245–260. DOI: 10.1007/s11666-007-9023-x.
25. Mariaux G. Modeling of the plasma spray process: from powder injection to coating formation // High Temperature Material Processes. 2001. 5(1). Pp. 61–85. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v5.i1.50.
26. Okulov R. A. et al. Development of the computer model of the plasma installation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. DOI:10.1088/1742-6596/2064/1/012044.

References

1. Farberov V. Ya. Pervonachal'naya podgotovka pozharny`x-spasatelej / V. Ya. Farberov, L. V. Mis`kevich, P. V. Rodionov. 2-e izd., ispr. i dop. Yurga, 2015. 387 s.
2. Pozharny`e avtomobili. Sankt- Peterburg, 2006. 507 s.
3. Pozharnaya i avarijno-spasatel'naya texnika / M. D. Bezborod`ko, S. G. Czarichenko, M. V. Aleshkov, V. V. Roenko, A. V. Rozhkov i dr. / pod red. M. D. Bezborod`ko. М., 2011.

4. Krivorogova A. S., Il'iny`x S. A., Korolev O. A., Il'iny`x N. I. Ispol`zovanie gidrofobny`x propitok, nanesenny`x na plazmonapy`lenny`e poverxnosti detalej pozharnoj texniki Aktual`ny`e problemy` i innovacii v obespechenii bezopasnosti: sbornik materialov Dnej nauki c mezhdunarodny`m uchastiem, posvyashheny`x 90-letiyu Grazhdanskoj oborony` Rossii (26–28 oktyabrya 2022 g.) v 2 ch. / red. koll. M. V. Elfimova, O. Yu. Demchenko, O. V. Bezzaponnaya [i dr.]. – Ekaterinburg : Ural`skij institut GPS MChS Rossii, 2022. Ch. 1. s. 96–100.
5. E`rkabaeva, E. O., Cheshun Yu. A. Kavitaciya v centrobezhy`x nasosax // Aktual`ny`e problemy` e`nergetiki – 2018: materialy` studencheskoj nauchno-texnicheskoj konferencii. Minsk, 2018. S. 620–621.
6. Krivorogova A. S., Bezzaponnaya O. V. Issledovanie fiziko-ximicheskix svojstv samoflyusuyushhegosya poroshka na osnove nikelya, ispol`zuemogo dlya uprochneniya poverxnostej detalej pozharno-texnicheskogo vooruzheniya // Texnosfernaya bezopasnost`. 2019. № 2 (23).
7. N. Ilinykh, A. Krivorogova, B. Gelchinski, S. Ilinykh, L. Kovalev, Thermodynamic modeling of composition and properties of self-fluxing materials based on the nickel, MATEC Web of Conferences. 329(2020) 02026 DOI: 10.1051/mateconf/202032902026
8. Gel`chinskij B.R., Il'iny`x S.A., Krashanin V.A., Krivorogova A.S. Sposob polucheniya zashhitnogo pokry`tiya. Patent na izobretenie 2741040 C1, 22.01.2021.
9. Xasuj A., Morigaki O. Naplavka i napy`lenie, per. s yaponskogo. M., 1985. 240 s.
10. Kudinov V. V. Plazmenny`e pokry`tiya. M., 1977. 184 s.
11. R.C. Tucker, Jr., Introduction to Coating Design and Processing, ASM Handbook, 1994, V.5. PP. 497-509.
12. Tushinskij L. I., Ploxov A. V. Issledovanie struktury` i fiziko-mexanicheskix svojstv pokry`tij. Novosibirsk, 1986. 199 s.
13. T.A. Zimoglyadova, H. Saage, V.A. Pasichnik, A.S. Egorova and O. Matts, Structure and Properties of Functional Self-Fluxing Nickel-Containing Coatings Obtained by Non-Vacuum Electron-Beam Cladding, Metal Science and Heat Treatment. V.60, No 9-10 (2019) 633–40 DOI: 10.1007/s11041-019-00330-4.
14. K. Simunovic, S. Havrlisan, T. Saric and D. Vukelic. Modeling and Optimization in Investigating Thermally Sprayed Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings: A Review, Materials, V.13, No20, (2020) 4584 <https://doi.org/10.3390/ma13204584>
15. I. Hemmati, V. Ocel`k, Microstructure and Phase Formation in a Rapidly Solidified Laser Deposited Ni-Cr-B-Si-C Hardfacing Alloy, Metallurgical and materials transactions. 2 (2014) 878-892.
16. N. Ilinykh, A. Krivorogova, B. Gelchinski, S. Ilinykh, L. Kovalev, Thermodynamic modeling of composition and properties of self-fluxing materials based on the nickel, MATEC Web of Conferences. 329(2020) 02026 DOI: 10.1051/mateconf/202032902026
17. Muxin V. S., Shextman S. R. Poverxnost` texnicheskogo ob`ekta: fizika, ximiya, mexanika, nanotexnologiya modifirovaniya // Vestnik UGATU. 2007. T. 9, № 1 (19). S. 84–91.
18. Vatolin N. A., Moiseev G. K., Trusov B. G. Thermodynamic modeling in the high-temperature inorganic systems. M., 1994.
19. B. G. Trusov, Programmatic system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures, Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie. (2012) 240-249 (In Russian).
20. G. V. Belov, B. G. Trusov, Thermodynamic modeling of chemically reacting systems, Moscow, Bauman Moscow State Technical University, (2013) (in Russian).
21. S. Kundas, V. Gurevich, A. Ilyuschenko, V. Okovity, Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes, Journal of advanced materials. V.32, №3 (2000) P.3-11.
22. Kundas S. P., Tonkonogov B. A., Kashko T. A., Komp`yuternoe modelirovanie texnologicheskix processov, Doklady` BGUIR. 3 (2004) 38–49.
23. S. Kundas, A. Ilyuschenko, Computer simulation and control of plasma spraying processes, Materials and Manufacturing Processes. V.17, Issue 1 (2006) 85–96 DOI 10.1081/AMP-120002799
24. He-Ping Li and E. Pfende, Three Dimensional Modeling of the Plasma Spray Process, Journal of Thermal Spray Technology. V. 16(2) (2007) 245–260 DOI: 10.1007/s11666-007-9023-x
25. G. Mariaux, P. Fauchais, A. Vardelle, B. Pateyron, Modeling of the plasma spray process: from powder injection to coating formation, High Temperature Material Processes 5(1) (2001) 61–85 DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v5.i1.50.
26. R. A. Okulov, E. V. Popov, B. R. Gelchinsky, A. A.Rempel, Development of the computer model of the plasma installation, Journal of Physics: Conference Series.2064 (2021) 012044 doi:10.1088/1742-6596/2064/1/012044