

Научная статья

УДК 621.762, 621.774

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>



Б.С. Ермаков¹, С.Б. Ермаков², О.В. Швецов¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

✉ shvec_off@mail.ru

ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СЛОЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО ПОЯСА

Аннотация. К числу современных вызовов в нефтедобыче и переработке первичного флюида относится повышенная коррозионная агрессивность перекачиваемых сред. Одним из путей повышения сопротивляемости оборудования коррозионным повреждениям является применение в аппаратах и устройствах, контактирующих с агрессивными жидкостями, нержавеющей сталей или биметаллических материалов. Целью настоящей работы явилось изучение влияния технологических параметров распыления на гранулометрический состав и свойства порошков 08X18H15, 07X16H6 и 08X17H22 для напыления на сварные швы биметаллических материалов. По результатам исследований была подтверждена возможность использования порошков нержавеющей сталей для нанесения защитных антикоррозионных покрытий методом плазменного напыления на сварные соединения узлов и конструкций технологического оборудования нефтедобывающих предприятий.

Ключевые слова: порошки, аддитивные технологии, плазменный атомайзер, биметаллические трубы, порошки сталей, 08X18H15, 07X16H6, 08X17H22, сварные швы, Арктика.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка комплексной модели надежности, работоспособности и определяющих показателей качества трубопроводных систем северного исполнения» (FEWN-2025-0001).

Для цитирования:

Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Швецов О.В. Производство порошков для изготовления коррозионного слоя биметаллических труб в условиях нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>*B.S. Ermakov¹, S.B. Ermakov², O.V. Shvetsov¹* ✉¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia✉ shvec_off@mail.ru

PRODUCTION OF POWDERS FOR THE MANUFACTURE OF A CORROSION LAYER OF BIMETALLIC PIPES IN ARCTIC OIL AND GAS FIELDS

Abstract. The increased corrosive aggressiveness of the pumped media is one of the modern challenges in oil production and primary fluid processing. One of the ways to increase the equipment resistance to corrosion damage is the use of stainless steels or bimetallic materials in devices that come into contact with aggressive liquids. The aim of this work was to study the effect of the technological parameters of spraying on the granulometric composition and properties of powders 08Cr18Ni15, 07Cr16Ni6 and 08Cr17Ni22 for spraying bimetallic materials onto the welds. According to the research results, the possibility of using stainless steel powders for applying protective anti-corrosion coatings by plasma spraying onto welded joints of components and structures of technological equipment at oil producing enterprises was confirmed.

Keywords: powders, additive technologies, plasma atomizer, bimetallic pipes, powder, steel, 08Cr18Ni15, 07Cr16Ni6, 08Cr17Ni22, weld, Arctic.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of a comprehensive model of reliability, performance and key quality indicators of northern pipeline systems” (FEWN-2025-0001).

Citation:

Ermakov B.S., Ermakov S.B., Shvetsov O.V., Production of powders for the manufacture of a corrosion layer of bimetallic pipes in Arctic oil and gas fields, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 84–94, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>

Введение. К числу современных вызовов в нефтедобыче и переработке первичного флюида относится повышенная коррозионная агрессивность перекачиваемых сред. Постепенная миграция нефтедобычи на север изменила принципиальный состав нефтяного флюида – в добываемых средах северных широт содержится значительно большее количество сероводорода, углекислого газа и т.п. Это приводит к ускоренному коррозионному износу оборудования – систем перекачки, фильтрации и очистки первичного продукта. Появляется риск ускоренного износа и аварийных остановок оборудования, повышаются затраты компаний на техническое обслуживание и замены вышедших из строя узлов и деталей. Как показал анализ эксплуатации технологического оборудования на месторождениях нефти, коррозия является одной из наиболее острых проблем, требующих скорейшего решения. Особо остро эта проблема встала в последние десятилетия, когда основные добывающие мощности крупных российских вертикально интегрированных нефтяных компаний переместились в северные области РФ – Арктику, Восточную и Западную Сибирь, Якутию и на Дальний Восток. Слабая транспортная инфраструктура, сложность организации своевременных ремонтных работ из-за сурового климата, малой численности населения и необходимости организации работ вахтовым методом, отсутствие в регионах ремонтно-восстановительных мощностей потребовали применять для

нефтедобычи и перекачки нефтяного флюида и попутного газа такие материалы, которые бы позволили снизить затраты на ремонт и замену оборудования, в разы повысить их коррозионную стойкость. К настоящему времени именно расходы на замену и ремонт поврежденного коррозией оборудования являются одной из основных статей расходов компаний, а общемировые расходы нефтяной промышленности на борьбу с коррозией составляют 3,7 млрд долл. в год [2–4]. К основным видам коррозии на трубопроводах нефти и газа относятся питтинг, щелевая коррозия, межкристаллитная коррозия, стресс-коррозия, особенно в средах, насыщенных сероводородом и углекислым газом, и водородное охрупчивание.

Одним из путей повышения сопротивляемости оборудования коррозионным повреждениям является применение в аппаратах и устройствах, контактирующих с агрессивными жидкостями, нержавеющей сталей или биметаллических материалов. Однако наряду с достоинством биметаллических материалов их применение сталкивается с рядом как экономических (высокая стоимость), так и технологических проблем, таких как защита сварных швов, которые при сварке часто теряют антикоррозионные свойства, присущие нержавеющей стали. Используемая на месторождениях ингибиторная или электрохимическая защита не всегда оказывается эффективной, а применение полимерных защитных покрытий не обеспечивает надежную защиту швов в присутствии в жидкости абразивных частиц, разрушающих полимер или при работе оборудования при повышенных температурах порядка 2000°C и выше [5]. По нашему мнению, одним из наиболее перспективных путей защиты сварных соединений биметаллических материалов является нанесение антикоррозионных лакирующих покрытий методом газотермического или плазменного напыления. Нанесение на поверхность швов относительно дешевых защитных покрытий является наиболее перспективным методом антикоррозионной защиты промышленных трубопроводов [6]. Однако к настоящему времени до конца не решен вопрос получения дешевых и качественных отечественных порошковых материалов для данного типа покрытий, а получение импортной продукции сталкивается с трудностями в связи с введением санкций рядом недружественных стран.

Среди методов получения порошков для газотермического напыления наибольшее развитие получил метод газовой атомизации, т.е. распыление расплава материалов в среде инертного газа. Это метод достаточно изучен, однако имеет целый ряд недостатков, таких как значительное число распыленных частиц с дефектами – сателлитами, недостаточной сферичностью, пористостью. Также к числу недостатков газовой атомизации относится то, что сам процесс становится рентабельным при получении значительных (от сотни килограммов) объемов порошка, требует значительного времени и усилий для перехода с одного распыляемого материала на другой. Поэтому для опытных производств, для малых и средних компаний, где процесс напыления не так велик, эти порошки оказываются достаточно дорогостоящими. В этом случае на смену газовой приходит плазменная атомизация, т.е. распыление твердого фидстока (чаще всего проволоки материала) в среде плазменного факела [7–11]. Такой метод достаточно экономичен, не требует сложного дорогостоящего оборудования и высококвалифицированного обслуживающего персонала, позволяет достаточно быстро переориентировать процесс с материала одного химического состава на другой. Одним из главных недостатков плазменной атомизации является невысокая производительность установок – обычно около 5–10 кг порошка в час – и достаточно строгие требования к геометрическим размерам и качеству распыляемых фидстоков [9, 12].

В СПбПУ был разработан и успешно внедрен в промышленность плазменный атомайзер [13], предназначенный для получения сферических порошков средних размеров (~40–140 мкм), что максимально полно удовлетворяет требованиям плазменного напыления. Данное устройство построено по принципу свободного распыления в колонне одного или нескольких фидстоков при одновременном использовании от одного до трех генераторов плазмы. Такая

«развязанная» схема установки позволяет максимально полно использовать теплофизические характеристики плазмы, что обеспечивает высокий – более 60% – выход частиц заданного гранулометрического состава [9, 14].

Целью настоящей работы явилось изучение влияния технологических параметров распыления на гранулометрический состав и свойства порошков 08X18H15, 07X16H6 и 08X17H22 для напыления на сварные швы биметаллических материалов.

Методы и материалы

Исследования были проведены на проволоках трех марок сталей диаметром 1,8 мм. Химический состав проволок полностью соответствует требованиям ГОСТ 5632–2014 к данным маркам сталей. Распыление проволок осуществлялось в среде аргона различного качества:

- аргоном технической чистоты первого сорта (ГОСТ 10157–2016) с содержанием аргона в газовой смеси не менее 99,987%, кислорода – 0,002%, азота – 0,01%, содержание паров воды – 0,001%;
- аргоном высокой чистоты марки 5.6 (ТУ 2114-005-53373468-2006) с содержанием аргона в газовой смеси не менее 99,9996%, кислорода – 0,00012%, азота, водорода и углекислого газа в сумме не более 0,003%.

При проведении процесса были выдержаны следующие технологические параметры:

- сила тока на плазмотроне изменялась в пределах 190 до 280 А;
- скорость подачи плазмообразующего газа – от 30 до 60 л/мин;
- скорость подачи проволоки – от 1,0 до 2,5 м/мин;
- скорость подачи защитного газа через систему кипящего слоя колонны – от 0 до 24 л/мин.

Для сокращения объема экспериментов был использован метод математического планирования путем построения и реализации квази D-оптимального плана второго порядка. В качестве параметра оптимизации был выбран гранулометрический состав получаемой порошковой массы при условии, что получаемые частицы будут соответствовать требованиям, предъявляемым к порошкам сферической формы, – т.е. отношение максимального линейного размера проекции частицы к ее минимальному размеру будет находиться в пределах 1,0–1,2 (ГОСТ 25849–83).

Результаты

В ходе первого этапа реализации плана были построены уравнения регрессии, определяющие связь между основными переменными – силой тока, скоростями плазмообразующего и защитного газов и скоростью подачи проволоки. Проверка адекватности модели проводилась по критерию Фишера (F-критерию) и путем оценки полученных полиномов по t-критерию Стьюдента, дисперсия проверена с помощью G-критерия Кохрена [15–16]. Второй этап – этап крутого восхождения модели – был проведен на суперкомпьютере СПбПУ методом крутого восхождения Бокса–Уилсона [17].

Благодаря проведенным расчетам были оптимизированы параметры распыления исследуемых проволок. Было показано, что для хромоникелевых сталей возможно подобрать единые технологические параметры (силы тока и скорость защитного газа) режима распыления; скорость подачи фидстока и скорость плазмообразующего газа зависят только от диаметра распыляемого фидстока. Учитывая, что диаметры всех проволок идентичны и составляли $1,8 \pm 0,05$ мм, режим распыления, обеспечивающий наилучшее качество получаемых порошков по сочетанию характеристик (величина гранулометрического состава в рамках фракций – 40–140 мкм, сферичность порошка – процент выхода годных фракций, табл. 1) имел следующие параметры:

- сила тока – 230–250 А;
- скорость подачи плазмообразующего газа – 40–45 л/мин;

- скорость подачи фидстока диаметром 1,8 мм – 1,9–2,2 м/мин;
- подача защитного газа на систему кипящего слоя – 120–150 л/мин.

Эти параметры обеспечивают сферичность порошка не ниже 95–98%, практически полностью отсутствуют сателлиты (т.е. число частиц порошка с сателлитами не превышает 0,05–0,08%), внутренняя пористость составляет около 0,1%, что полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 58418–2019.

Таблица 1

Распределение по величине гранулометрического состава порошка фракций

Table 1

Distribution of the granulometric composition of the powder fractions

Марка стали	Процент содержания порошка фракций в распыленной массе*					Выход годного
	40–60 мкм	60–80 мкм	80–100 мкм	100–120 мкм	120–140 мкм	
08X18H15	13	17	14	11	8	63
07X16H6	12	16	12	13	9	63
08X17H22	11	17	13	13	12	64

Примечание: * содержание фракций ≤ 40 мкм – до 15%, причем фракция менее 20 мкм крайне сложно сепарируется на виброситах, и оценить ее количество точно не удастся; фракция ≥ 140 мкм ~ 20%.

Несоблюдение оптимизированного режима распыления снижает качество получаемых частиц. Так, уменьшение силы тока на 30 А (до 190–210 А) приводит к смещению основной формы частиц от сферической к округлой, а при дальнейшем снижении силы тока форма частиц приобретает оскольчатую форму (см. ГОСТ 25849–83). Снижение скорости плазмообразующего газа также изменяет форму и размер частиц, и постепенно, по мере снижения скорости, наиболее массовая фракция порошка смещается от 60–80 мкм в сторону больших размеров – 100 мкм и меньшей сферичности. В табл. 2 приведены характеристики получаемого порошка в зависимости от параметров распыления, в той же таблице показано влияние качества плазмообразующего газа на развитие пористости в поверхности и теле распыленных частиц (рис. 1).

Следует отметить, что качественные показатели распыленных порошков (форма, гранулометрический состав, процент дефектных частиц) всех трех сталей практически не зависят от их химического состава, а определяются только параметрами распыления, в первую очередь – силой тока и скоростью плазмообразующего газа, что позволяет считать, что разработанный режим распыления может использоваться для всех марок хромоникелевых сталей. К числу главных показателей качества процесса распыления также следует отнести стабильность химического состава исходных фидстоков и получаемых порошков (табл. 3), которая была проверена на микроспектрометре, входящем в комплекс сканирующего электронного микроскопа SUPRA 55VP-25–78.

Анализ табл. 3 подтверждает, что плазменное распыление не приводит к потере концентрации основных легирующих элементов, и составы исходных фидстоков и получаемых порошков остаются практически неизменными.

В ходе исследований частиц методом Оже-спектроскопии (табл. 2) было отмечено весьма неравномерное распределение элементов по объему металла. Измерение концентраций элементов по глубине от поверхности было произведено на металлографическом шлифе частицы диаметром около 48 мкм. Очистка поверхности перед Оже-спектроскопией выполнена методом ионного травления. Показано, что максимальные концентрации хрома и других тугоплавких элементов находятся в центральных зонах частиц, там же отмечено повышенное содержание

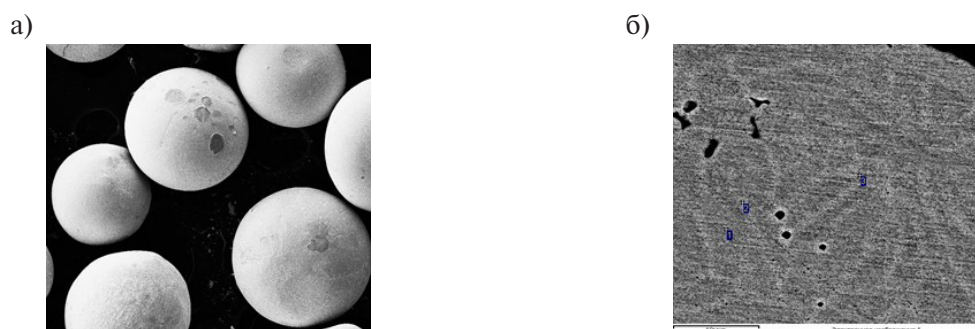


Рис. 1. Поверхностная (а) и внутренняя (б) пористость в частицах распыленного порошка 08X17H22

Fig. 1. Surface (a) and internal (b) porosity in particles of atomized powder 08Cr17Ni22

Таблица 2

Влияние параметров распыления на форму, гранулометрический состав и дефектность порошковых частиц

Table 2

Effect of spraying parameters on the shape, granulometric composition and defects of powder particles

Сталь, марка	Режим		Фракция, мкм (%)			Форма (%)			Пористость, %	
	I, А	V _г л/м	60–80	80–100	100–120	1*	2	3	4**	5
08X18H15	230	45	17	14	11	97	3	0	0,08	0,14
	230	30	16	14	13	94	6	0	0,11	0,19
	190	45	14	16	14	91	8	1	0,23	0,43
	190	30	12	15	18	88	10	2	0,45	0,77
08X17H22	230	45	17	13	13	96	4	0	0,04	0,12
	230	30	15	15	15	92	89	0	0,14	0,21
	190	45	12	14	17	89	9	2	0,27	0,41
	190	30	10	13	19	84	12	4	0,56	0,86

Примечания: * порошки 1 – сферической; 2 – округлой и 3 – оскользящей (ГОСТ 25849–83) формы; ** 4 – аргон высокой чистоты марки 6; 5 – аргон технической чистоты первого сорта (по ГОСТу 10157–2016).

углерода, хотя карбидных включений как простых – типа MC, так и сложных – MxSy – обнаружено не было. Высокие скорости охлаждения металла не позволяют сформироваться химическим соединениям с жесткой кристаллической решеткой, и в данном случае, вероятно, имеют место кластерные предвыделения карбидообразующих элементов. Распределение кремния и серы носило скачкообразный характер, напоминающий ликвационные процессы, происходящие при кристаллизации сварочной ванны. Распределение никеля и марганца можно признать равномерным, с учетом концентрационных флуктуаций. Азот равномерно распределен по объему частицы. Максимальная концентрация кислорода была отмечена на поверхности, с постепенным снижением по мере удаления в тело частицы (табл. 4).

Анализ табл. 5 показал, что качество плазмообразующего газа критически сказывается на качестве распыленных порошков. Использование аргона с примесями других газов резко ухудшает структуру порошковой частицы – на ее поверхности и в объеме возникают сложные неметаллические частицы, в первую очередь, оксиды и нитриды, которые могут привести к снижению прочности изделия в ходе 3D-печати.

Таблица 3а

**Химический состав исходной проволоки Cr-Ni сталей
и средний состав распыленного порошка. Основные элементы**

Table 3a

**Chemical composition of the initial Cr-Ni steel wire
and the average composition of the sprayed powder. Basic elements**

Материал	Химический состав, масс. %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
Проволока 08X18H15	0,074	0,375	1,312	17,33	14,21
Средний состав порошка	0,077	0,373	1,314	17,21	14,09
Проволока 08X17H22	0,065	0,456	0,941	16,86	21,24
Средний состав порошка	0,064	0,456	0,937	16,93	21,26
Проволока 07X16H6	0,053	0,407	0,665	16,93	6,97
Средний состав порошка	0,051	0,396	0,644	16,95	6,99

Таблица 3б

**Химический состав исходной проволоки Cr-Ni сталей и средний состав распыленного порошка.
Среднее содержание примесных элементов в частицах порошка**

Table 3b

**Chemical composition of the initial Cr-Ni steel wire and the average composition of the sprayed powder.
Average content of impurity elements in powder particles**

Состав газа	Сталь, марка								
	08X18H15			08X17H22			07X16H6		
	N	O	S	N	O	S	N	O	S
1	0,011	0,031	0,010	0,0012	0,025	0,009	0,009	0,027	0,011
2	0,005	0,014	0,009	0,004	0,012	0,009	0,006	0,009	0,010

Оценка технологических свойств порошков – их насыпной плотности и текучести – показала полное соответствие требованиям (ГОСТ 14086–68 и ГОСТ 20899–98). Установлено, что насыпная плотность порошка стали 08X18H15 составила 21,39 с, 07X16H6 – 21,48 с, 08X17H22 – 21,53 с, а текучесть порошков – 21,92, 21,73 и 21,88 соответственно.

Обсуждение

На основании проведенных исследований представляется возможным сделать несколько выводов. Определены параметры распыления порошков нержавеющей хромоникелевых сталей, при соблюдении оптимизированного режима распыления которых частицы порошка имеют правильную сферическую форму, соответствующую уровню требований к порошкам (ГОСТ Р 58418–2019).

Анализ полученных в ходе экспериментов функций отклика и качества полученных порошков всех исследованных в работе марок сталей показал их практическую идентичность, что позволяет считать, что разработанный режим распыления может использоваться не только для изученных, но и для всех других марок метастабильных и стабильных хромоникелевых сталей, что подтверждается данными, приведенными в [8], обеспечивая в порошке неизменность химического состава распыляемого фидстока.

Таблица 4

Распределение элементов в объеме частицы порошка стали 08X17H22

Table 4

Distribution of elements in the volume of a 08Cr17Ni22 steel powder particle

Элемент	Среднее	На глубине от поверхности частицы (мкм)								
		0,001	0,1	1000	2	5	10	15	20	24
Cr	16,93	16,662	16,772	17,032	17,453	17,421	17,531	16,871	16,667	16,443
C	0,065	0,056	0,061	0,069	0,074	0,077	0,081	0,069	0,065	0,054
Si	0,64	0,731	0,411	0,781	0,772	0,637	0,599	0,511	0,700	0,597
S	0,009	0,014	0,012	0,009	0,007	0,009	0,014	0,007	0,011	0,013
Mn	0,94	0,871	0,966	0,946	0,993	0,889	0,943	1,021	0,885	0,937
Ni	21,26	21,288	21,564	21,331	21,197	21,195	20,843	20,779	20,931	21,287
N	0,004	0,009	0,003	0,005	0,003	0,007	0,007	0,006	0,004	0,009
O	0,012	0,039	0,031	0,014	0,012	0,011	0,009	0,010	0,011	0,004

Таблица 5

Неметаллические включения в частицах порошка сталей

Table 5

Nonmetallic inclusions in steel powder particles

Порошок		Неметаллические включения (по методу Ш4, ГОСТ 1778-70)*								
		ОТ	ОС	СХ	СП	СН	С	НС	НТ	НА
08X18H15	1**	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	1	1	1
07X16H6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	2	1	0
08X17H22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	3	0	0	1	0	0	1	1	1

*Примечание: ОТ – оксиды точечные, ОС – оксиды строчечные, СХ – силикаты хрупкие, СП – силикаты пластичные, СН – силикаты недеформирующиеся, С – сульфиды, НС – нитриды строчечные, НТ – нитриды и карбонитриды точечные, НА – нитриды алюминия; ** 1 – аргон высокой чистоты марки 6; 2 – аргон технической чистоты (ГОСТ 10157–2016, марка В)

Исследования технологических свойств порошков текучести и насыпной плотности опытных проб порошков показал соответствие требованиям НТД.

Заключение

Результатами исследований была подтверждена возможность использования порошков нержавеющей сталей для нанесения защитных антикоррозионных покрытий методом плазменного напыления на сварные соединения узлов и конструкций технологического оборудования нефтедобывающих предприятий. Проведенные исследования коррозионной стойкости сварных соединений ряда малоуглеродистых низколегированных сталей, используемых в качестве материалов технологических трубопроводов перекачки нефтяного флюида, подтвердили высокий уровень антикоррозионной защиты против питтинговой коррозии и коррозии в средах, насыщенных сероводородом и углекислым газом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Иванов С.С., Перекупка А.Г., Багин Д.Е.** Анализ причин высокой коррозионной агрессивности попутного нефтяного газа месторождений Западной Сибири // *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. 2022. Т. 1, № 7. С. 110–117. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-110-117
- [2] **Царьков И.В., Мозговой Г.С., Шерер С.А.** Факторы, вызывающие осложнения при эксплуатации оборудования нефтегазовой отрасли, а также способы борьбы с ними // *Булатовские чтения*. 2021. Т. 2. С. 204–206.
- [3] **Гоник А.А.** Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. М.: Недра, 1976.
- [4] **Хусаинова Д.А.** Обоснование технологии предупреждения образования солеотложения и коррозии оборудования в нефтяных скважинах с использованием ингибиторов комплексного действия: дисс. ... канд. техн. наук, СПб.: Горный университет, 2018.
- [5] **Поварова Л.В., Мунтян В.С., Скиба А.С.** Анализ современных методов защиты нефтепромыслового оборудования от коррозии // *Булатовские чтения*. 2020. Т. 4. С. 121–129.
- [6] **Ермаков Б.С., Альхименко А.А., Шапошников Н.О., Ермаков С.Б., Шатский Т.Е., Иголкин А.Ф.** Использование распыленных порошков для создания покрытий в сварных швах труб промышленных трубопроводов // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке*. 2019. Т. 1. С. 113–118.
- [7] **Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: СПбПУ, 2018. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id18-12
- [8] **Сироткин О.С.** Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 22–25.
- [9] **Ермаков С.Б.** Разработка технологии и оборудования плазменного распыления порошков для аддитивных машин: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбРПУ, 2024.
- [10] **Ермаков С.Б., Гюлиханданов Е.Л.** Получение порошков для аддитивных машин методом плазменного распыления // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2021. № 6. С. 29–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-29-41
- [11] **Кисон В.Э., Мустафаев А.С., Сухомлинов В.С.** Разработка новой плазменной технологии получения чистого белого корунда // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21, № 3. С. 380–385. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385
- [12] **Григорьев А.В., Разумов Н.Г., Попович А.А., Самохин А.В.** Плазменная сфероидизация порошков на основе сплавов Nb-Si, полученных механическим легированием // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017. Т. 23, № 1. С. 247–254. DOI: 10.18721/JEST.230125
- [13] **Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Одноблюдов М.А.** Устройство для получения металлических порошков. Патент RU 204335 U1 Российская Федерация, МПК В22F 9/14; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «СПбПУ»; заявл. 09.12.20; опубл. 20.05.21, Бюл. № 14.
- [14] **Ермаков С.Б.** Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2021. Т. 55, № 1. С. 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15
- [15] **Сурков В.А.** Исследование воздействия высокочастотной плазмы пониженного давления на механические свойства порошковых материалов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 11. С. 39–41.
- [16] **Чуновкина А.Г., Ястребов А.П., Чабаненко А.В., Рассыхаева М.Д.** Качество технологических процессов в аддитивном приборостроении: модели машинного обучения // *Компетентность*. 2024. № 6. С. 46–50. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-6-46-50
- [17] **Сычёв В.В.** К асимптотической теории отрывного обтекания тел // *Известия Российской Академии Наук. Механика Жидкости и Газа*. 2010. № 3. С. 110–128.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

ЕРМАКОВ Сергей Борисович – директор, Тюменский индустриальный университет, канд. техн. наук.

E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

ШВЕЦОВ Олег Викторович – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

REFERENCES

- [1] **S.S. Ivanov, A.G. Perekupka, D.E. Bagin**, Analysis of the causes of high corrosive aggressiveness of associated petroleum gas from Western Siberia fields, *PRoneft. Professionally about Oil*, 7(1) (2022) 110–117. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-110-117
- [2] **I.V. Tsarkov, G.S. Mozgovoy, S.A. Sherer**, Factors that cause complications in the operation of oil and gas equipment and ways to deal with them, *Bulatovskie chteniia (Bulatov Readings)*, 2 (2021) 204–206.
- [3] **A.A. Gonik**, *Korroziia neftepromyslovogo oborudovaniia i mery ee preduprezhdeniia* [Corrosion of oilfield equipment and measures for its prevention]. Moscow: Nedra, 1976
- [4] **D.A. Khusainova**, *Obosnovaniia tekhnologii preduprezhdeniia obrazovaniia soleotlozheniia i korrozii oborudovaniia v neftianykh skvazhinakh s ispol'zovaniem ingibitorov kompleksnogo deistviia: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Justification of technology for preventing the formation of scaling and corrosion of equipment in oil wells using inhibitors of complex action], St. Petersburg, 2018.
- [5] **L.V. Povarova, V.S. Muntian, A.S. Skiba**, Analysis of modern methods for protecting oilfield equipment from corrosion, *Bulatovskie chteniia (Bulatov Readings)*, 4 (2020) 121–129.
- [6] **B.S. Ermakov, A.A. Al'khimenko, N.O. Shaposhnikov, S.B. Ermakov, T.E. Shatskii, A.F. Igolkin**, *Is-pol'zovanie raspylennykh poroshkov dlia sozdaniia pokrytii v svarnykh shvakh trub promyslovykh truboprovodov* [Using atomized powders to create coatings in welded joints of industrial pipelines], *Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke* [Low-temperature and food technologies in the 21st century], 1 (2019) 113–118.
- [7] **A.I. Rudskoi, K.N. Volkov, S.Yu. Kondratev, Y.A. Sokolov**, *Physical processes, and technology of obtaining metal powders from a melt*, St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2018. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id18-12
- [8] **O.S. Sirotkin**, State-of-the-art and prospects of development of additive technologies, *Aviation Industry*, 2 (2015) 22–25.
- [9] **S.B. Ermakov**, *Razrabotka tekhnologii i oborudovaniia plazmennogo raspyleniia poroshkov dlia additivnykh mashin: avtoreferat diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of technology and equipment for plasma spraying of powders for additive machines]. St. Petersburg: SPbRPU, 2024.
- [10] **S.B. Ermakov, E.L. Gulihandanov**, Manufacturing powders for additive machines through plasma atomizing, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 6 (2021) 29–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-29-41

- [11] **V.E. Kison, A.S. Mustafaev, V.S. Sukhomlinov**, Development of a new plasma technology for producing pure white corundum, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 21 (3) (2021) 380–385. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385
- [12] **A.V. Grigoriev, N.G. Razumov, A.A. Popovich, A.V. Samokhin**, Plasma spheroidization of Nb-Si-based powder alloys obtained by mechanical alloying, *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*, 23 (1) (2017) 247–255. DOI: 10.18721/JEST.230125
- [13] **B.S. Ermakov, S.B. Ermakov, M.A. Odnobliudov**, *Ustroistvo dlia polucheniia metallicheskih poroshkov* [Device for producing metal powders], Russian Federation Patent, No. RU 204335 U1 (2021).
- [14] **S.B. Ermakov**, Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying, *Frontier Materials & Technologies*, 1 (55) (2021) 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15
- [15] **V.A. Surkov**, Study of low-pressure high-frequency plasma influence on mechanical properties of powdered materials, *Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 11 (2010) 39–41.
- [16] **A.G. Chunovkina, A.P. Yastrebov, A.V. Chabanenko, M.D. Rassykhaeva**, Quality of Technological Processes in Additive Instrumentation: Machine Learning Models, *Competency*, 6 (2024) 46–50. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-6-46-50
- [17] **V.V. Sychev**, K asimptoticheskoi teorii otravnogo obtekaniia tel [On an asymptotic theory of separated flow around bodies], *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Mekhanika Zhidkosti i Gaza* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Fluid and Gas Mechanics], 3 (2010) 110–128.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Sergey B. ERMAKOV – *Industrial University of Tyumen.*

E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Поступила: 27.11.2025; Одобрена: 10.12.2025; Принята: 11.12.2025.

Submitted: 27.11.2025; Approved: 10.12.2025; Accepted: 11.12.2025.