

УДК 621.762

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-11

Эффект сублимации в технологии центробежно-дугового диспергирования карбида вольфрама

А. Е. Зверовщиков¹, Д. А. Борисов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹azwer@mail.ru, ²steerman70098@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сублимация при высокотемпературном разрушении твердых сплавов влияет на формирование доли ультрадисперсных частиц. Для последующих технологий использования порошкового сырья этот эффект приводит к существенным изменениям режимов формования изделий. Определение массовой доли сублимации актуально и для оценки рентабельности метода центробежно-дугового диспергирования (ЦДД). Цель работы – создание методики теоретических вычислений, позволяющей установить, какая часть диспергируемого при помощи плазменной дуги стержня сублимирует в зависимости от условий. *Материалы и методы.* Вычисления, позволяющие спрогнозировать технологический выход сублимировавшего материала, применимы для иных технологических процессов, связанных с высокотемпературным диспергированием материалов. Приведены данные по полученным при помощи методов ЦДД и электродугового диспергирования порошков. *Результаты.* Проведены вычисления, позволяющие установить в процентах долю испарившегося и сублимировавшего карбида вольфрама в процессе используемого исследователями из Пензенского государственного университета метода ЦДД; созданы формулы, подходящие для проведения аналогичных вычислений специалистами, занятыми работами со сходными процессами. *Выводы.* На основании данных по испарению, сублимации и требуемой электроэнергии можно утверждать, что метод ЦДД подходит для проектирования автоматизированных установок промышленного типа для получения порошкового сырья для порошковой металлургии.

Ключевые слова: технология диспергирования, сублимация, карбид вольфрама, центробежно-дуговое диспергирование, уравнение Герца – Кнудсена

Для цитирования: Зверовщиков А. Е., Борисов Д. А. Эффект сублимации в технологии центробежно-дугового диспергирования карбида вольфрама // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 126–135. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-11

The sublimation effect in the technology of centrifugal arc dispersion of tungsten carbide

A.E. Zverovshchikov¹, D.A. Borisov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹azwer@mail.ru, ²steerman70098@yandex.ru

Abstract. *Background.* Sublimation during high-temperature fracture of hard alloys affects the formation of a fraction of ultrafine particles. For subsequent technologies of using powder raw materials, this effect leads to significant changes in the molding modes of products. The determination of the mass fraction of sublimation is also relevant for assessing the

profitability of the CDD method. The purpose of this work is to create a theoretical calculation methodology that makes it possible to determine which part of a rod dispersed using a plasma arc sublimates depending on the conditions. *Materials and methods.* Calculations that make it possible to predict the technological yield of sublimated material. These calculations are applicable for other technological processes related to high-temperature dispersion of materials. Data on powders obtained using CDD and EDD methods are presented. *Results.* The article contains calculations that make it possible to determine the percentage of evaporated and sublimated tungsten carbide in the process of the CDD method used by researchers from PSU; formulas have been created that are suitable for carrying out similar calculations by specialists engaged in work with similar processes. *Conclusions.* Based on data on evaporation and sublimation, as well as the required electricity, the CDD method is suitable for designing automated industrial plants for the production of powder raw materials for powder metallurgy.

Keywords: dispersion technology, sublimation, tungsten carbide, centrifugal arc dispersion, the Hertz – Knudsen equation

For citation: Zverovshchikov A.E., Borisov D.A. The sublimation effect in the technology of centrifugal arc dispersion of tungsten carbide. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):126–135. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-11

Введение

Развитие аддитивных технологий формообразования и повышение безотходности при изготовлении машиностроительных изделий вплотную связано с технологиями получения порошковых материалов. Одним из перспективных методов производства порошковых материалов является получение расплава при помощи электрической дуги и его распыление центробежными силами. Проблема связи технологических режимов и фракционного состава продукта при получении порошкового сырья для современных аддитивных технологий продолжает сохранять актуальность. Сублимация части диспергируемого материала с его последующей конденсацией из газовой фазы приводит к появлению высокодисперсной фракции материала, которая, с одной стороны, может использоваться для формирования высококачественных изделий, с другой стороны, при определенной доле в сырье резко меняет технологию формования и спекания в сторону усложнения [1, 2].

Несмотря на острую необходимость прогнозирования доли сублимации в высокотемпературных технологиях, главные оценки по доли испарения базируются на эмпирических замерах. Так, для сварки распространена формула оценки мощности, подводимой к электроду [3].

Данная оценка пригодна для узкоспецифических характеристик процесса сварки и требует коррекции для применения к другим высокотемпературным технологическим процессам.

Весьма значимы работы, проведенные в смежных отраслях, где сублимацию используют для получения сверхчистых веществ, исследования фазовых переходов и других свойств материалов [4, 5]. Но в них непосредственная оценка объемов сублимации не приводится.

Данное исследование ставит целью теоретически установить основные величины и зависимости процесса сублимации карбида вольфрама при методе центробежно-дугового диспергирования (ЦДД) твердых сплавов на основании теплофизических принципов.

Материалы и методы

Проведена исследовательская работа по определению доли потерь перерабатываемого сырья при реализации метода электродуговой плавки на экспериментальной установке ЦДД [4, 6]. В основе установки – вращающийся ротор и подводимый к нему оплаваемый (расходный) стержень. В штатном режиме оплавление стержня осуществлялось электрической дугой, возникающей при подаче разнополюсного напряжения на ротор и оплаваемый стержень. Установка включала также камеру диспергирования для сбора порошкового материала, наружный корпус, приводы для вращения ротора и оплаваемого стержня и ряд других сборочных единиц [7, 8].

Методы теоретических исследований основаны на работе с имеющимися данными по основным параметрам исследуемого карбида.

В основе обозначенной проблемы лежит уравнение Герца – Кнудсена, которое связывает скорость испарения с поверхности с рядом параметров испаряемого материала:

$$w = \frac{\alpha_v}{\sqrt{2\pi MkT}} (P_s - P_0), \quad (1)$$

где w – скорость испарения моль/м² · с; α_v – коэффициент, характеризующий отражающую способность поверхности, с которой происходит испарение, до получения экспериментальных данных принимается равным 1; M – молекулярная масса испаряемого вещества; k – постоянная Больцмана, $1,3805 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; T – температура плавления карбида вольфрама, принимается равной 3073 К; P_s – парциальное давление пара испаряемого вещества; P_0 – парциальное давление пара испаряемого вещества до начала процесса, принимается равным 0.

Формула Герца – Кнудсена рассматривается как основная для расчета параметров процессов испарения, например, в работах Обнинского физико-энергетического института [9], и Чикагского университета [10].

Основная проблема при использовании данной формулы заключается в сложности определения парциального давления; однако можно отталкиваться от формулы Клапейрона – Менделеева:

$$P_s V = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2)$$

или

$$P_s = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{RT}{V}, \quad (3)$$

где m – масса испаренного вещества; μ – молярная масса вещества; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; V – объем, в котором происходит испарение.

С подстановкой равенства (2) формула Герца – Кнудсена обретет вид

$$w = \frac{\alpha_v}{\sqrt{2\pi MkT}} \cdot \frac{mRT}{\mu V} = \frac{\alpha_v m R \sqrt{T}}{\mu V \sqrt{2\pi M k}}. \quad (4)$$

При этом следует рассматривать испарение как с расходного стержня в ходе его диспергирования, так и с образовавшихся гранул материала до их кристаллизации (сублимацию с поверхности твердого вещества будем считать пренебрежительно малой).

Кроме того, надо помнить и о проходящем в то же время процессе конденсации. Так как он зеркален по отношению к испарению, то будем исходить из того, что формула Герца – Кнудсена описывает и его:

$$w_1 = \frac{\alpha_v}{\sqrt{2\pi MkT}} (P_s - P_f), \quad (5)$$

где P_s – парциальное давление пара в начале процесса; P_f – парциальное давление пара при завершении процесса (после кристаллизации).

Введя обозначение

$$A = \frac{\alpha_v m R}{\mu V \sqrt{2\pi Mk}},$$

получим выражение для скорости испарения

$$w = A \sqrt{T_{пл}} \quad (6)$$

и для скорости конденсации

$$w_1 = A \sqrt{T_s} - A \sqrt{T_{пл}}, \quad (7)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления карбида вольфрама; T_s – температура начала конденсации.

При этом предполагается, что температура расходного стержня постоянна (и в начале, и в завершении процесса) – это температура плавления, которая неизменна. То есть $T_s = T_{пл}$, и испарение не происходит; пар на этом участке насыщенный.

Примем гипотезу, что процесс испарения продолжается от начала перемещения капли из зоны, обогреваемой электрической дугой, по траектории, определяемой инерционным силовым полем, до момента достижения температуры кристаллизации, которая равна температуре плавления.

Из полученных выражений для w и w_1 можно получить соотношение скоростей конденсации и испарения:

$$\frac{w_1}{w} = \frac{A \sqrt{T_s} - A \sqrt{T_{пл}}}{A \sqrt{T_{пл}}} = \frac{\sqrt{T_s}}{\sqrt{T_{пл}}} - 1 = 0,063.$$

Соответственно, коэффициент, характеризующий испарение с учетом конденсации, будет равен 0,937.

При определении параметров, входящих в формулу для определения скорости испарения, будем исходить из того, что тепловая энергия, поступающая в частицу, распределяется между молекулами согласно стандартному нормальному распределению с пиковым значением, соответствующим величине удельной теплоты плавления карбида вольфрама.

При стандартном нормальном распределении плотность вероятности некой величины x определяется по экспоненциальной формуле

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}. \quad (8)$$

В нашем случае будем рассматривать x как соотношение некоего количества теплоты, поступившего в гранулу, с удельной теплотой плавления карбида вольфрама: $x = Q / Q_{\text{пл}}$. Причем в рассматриваемом случае интерес представляет соотношение удельной теплоты испарения с удельной теплотой плавления, т.е. определение плотности вероятности того, сколько молекул получают энергию, достаточную для пересечения границы «расплав–газ», т.е. для испарения:

$$x = \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{пл}}}. \quad (9)$$

Для большинства неметаллов соотношение между теплотой плавления и теплотой испарения [11] составляет примерно от 1:4 до 1:12. Выберем среднее значение при соотношении 1:8, что при оценочных расчетах вполне допустимо.

Для этого исследования решено рассмотреть результаты работы по получению частиц порошка карбида вольфрама методом ЦДД, в рамках которой были получены гранулы средним диаметром 4,17 мкм [8]. Масса такой гранулы $598740 \cdot 10^{-18} \text{ кг} \approx 6 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$.

Молярная масса определена для WC как $183,85 + 12 = 195,85$ грамм/моль, или $0,19585 \text{ кг/моль}$. Молекулярная масса M определена как произведение обратного числа Авогадро на абсолютную молекулярную массу WC : $1,673 \cdot 10^{-27} \cdot 195,85 = 3,28 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$. Объем V рассчитан как объем камеры диспергирования: $V = 0,157 \text{ м}^3$.

Результаты

Подставляя найденные в предыдущем разделе значения в формулу для определения плотности вероятности

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{пл}}} \right)^2}, \quad (10)$$

получим вероятность нагрева молекулы карбида вольфрама в грануле до температуры испарения $\varphi = 4,4 \cdot 10^{-15}$.

Масса пара m равна произведению массы гранулы на φ :

$$m = 6 \cdot 10^{-13} \cdot 4,4 \cdot 10^{-15} = 2,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Подставляя полученные значения в формулу для определения скорости испарения, получим скорость испарения с поверхности одной гранулы:

$$w = 7,306 \cdot 10^{-3} \text{ моль/м}^2 \cdot \text{с}.$$

С учетом того, что площадь поверхности сферической гранулы диаметром 4,17 мкм $S = \pi d^2 = 54,63 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, скорость истечения пара с поверхности гранулы равна

$$W = w \cdot S = 4 \cdot 10^{-13} \text{ моль/с.}$$

Масса истекающего пара:

$$m_1 = W \cdot \mu = 7,834 \cdot 10^{-14} \text{ кг/с.}$$

Формула, устанавливающая зависимость между радиусом гранулы r и временем ее конденсации τ , определена в [12]:

$$\chi(\tau) = 1 - \exp \left\{ -\frac{4}{3} \pi \int_0^{\tau} J(t) \left[r + \int_t^{\tau} U(t) dt \right]^3 dt \right\}. \quad (11)$$

Интегрируя и подставляя численные значения в эту формулу, получим время кристаллизации гранулы диаметром 4,17 мкм – 0,29 мкс.

Окончательно масса испарившегося с поверхности гранулы вещества равна произведению m_1 на время кристаллизации τ и поправочный коэффициент, учитывающий конденсацию пара, равный 0,937. В результате получаем

$$M_1 = 7,834 \cdot 10^{-14} \cdot 0,29 \cdot 0,937 = 2,13 \cdot 10^{-14} \text{ кг.}$$

С учетом массы гранулы $6 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$ определим, что потери на испарение с ее поверхности в ходе электродугового диспергирования методом ЦДД составляют 3,5 %.

Обсуждение

Таким образом, в рамках проведенной исследовательской работы был получен показатель потерь при сублимации карбида вольфрама, равный 3,5 %. В ходе опытной работы в качестве основного способа оплавления расходного стержня был использован метод ЦДД. Согласно ряду авторитетных источников [13, 14] потери металла при дуговой плавке составляют от 3 до 9 % (средний показатель – 7,9 %). То есть расчетный показатель потерь на испарение карбида вольфрама при плавке расходного стержня методом ЦДД практически совпадает с показателем потерь при ныне преобладающих вариантах получения порошкового материала электродуговыми (ЭДД) и плазменными методами. Таким образом, мы можем говорить о приемлемости метода ЦДД как альтернативы методам электродугового и плазменного диспергирования с точки зрения минимизации потерь.

В сравнении с работой [15] можно увидеть выигрыш в применяемом напряжении – 53 В в методе ЦДД [3] против 100 В в электроэрозионном диспергировании (ЭЭД) (притом стали, а не карбида вольфрама). В работе [16] также отмечено применение напряжения в диапазонах от 80 до 160 В.

В то же время метод ЦДД обеспечивает более сбалансированные размеры частиц меньших размеров, чем полученные методом ЭДД. Так, по результатам фракционного анализа партии порошка, полученного методом

ЦДД из смеси карбида вольфрама и полукарбида вольфрама в лаборатории НПО «Старт» (г. Заречный, Пензенская обл.) средний размер частицы 16,16 мкм (общий вес партии 85 г). В то же время согласно источнику [15] по результатам двух опытных работ с использованием сырья на основе стали ШХ15 получены методом ЭЭД две партии порошка со средним размером частиц 21,2 мкм, т.е. с незначительным превышением среднего размера частиц, полученных методом ЦДД. При этом коэффициент элонгации составил 2,4, т.е. форма частиц приближается к чешуйчатой, что является отрицательным фактором при спекании порошка. В то же время коэффициент элонгации частиц, полученных методом ЦДД, составляет 1,09, т.е. форма частиц близка к сферической.

Метод воздействия потоком плазмы был исследован в целях получения более стабильного процесса оплавления расходного стержня. И, как показывают результаты серии опытов, удалось реализовать процесс диспергирования со штатными показателями по размерам и отклонению гранул от сферической формы в постоянном режиме без корректировки его в ходе оплавления серии заготовленных расходных стержней.

Заключение

Потери на сублимацию расходного материала сравнимы с потерями, типичными для иных процессов, использующих электрическую дугу.

Напряжение, используемое в методе ЦДД, меньше, чем у аналогов, что дает конструктивные преимущества и экономию энергии.

Вариант диспергации с оплавлением расходного материала при помощи метода ЦДД может быть эффективен при проектировании автоматизированных установок промышленного типа для получения сырья для порошковой металлургии.

Список литературы

1. Байрамов Р. К. Разработка процессов получения высокодисперсных порошков при электроэрозии металлов в водных растворах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.06. М., 2010. 255 с. EDN: QFDSIT
2. Дворник М. И. Разработка физико-химических и технологических основ переработки вольфрамокобальтового твердого сплава электроэрозионным диспергированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Хабаровск, 2006. 117 с. EDN: NNWKON
3. Зверовщиков А. Е., Киреев С. Ю., Розен А. Е. [и др.]. Формирование гетерогенных структур в процессе центробежно-дугового диспергирования материалов на основе карбида вольфрама. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 158 с. EDN: RONACM
4. Патент № 2746197 С1 Российская Федерация, МПК В22F 9/10, В22F 9/14. Способ получения мелкодисперсного порошка тугоплавкого материала / Зверовщиков А. Е., Зверовщиков В. З., Колмаков К. М., Борисов Д. А. № 2020115605 ; заявл. 11.05.2020 ; опубл. 08.04.2021 ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». EDN: CMAAQS
5. Павлов В. П., Кудоярова В. М. Математическое моделирование физико-химического эффекта процесса сублимации на поверхности теплозащитного покрытия из полимерного композиционного материала при интенсивном высокотемпературном нагреве // Решетневские чтения. 2012. Т. 2. С. 499–500. EDN: UNKZWT

6. Гончарова Л. М. Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках : дис. ... канд. физ.-матем. наук : 01.04.07. Ново-черкасск, 2019. 116 с. EDN: RHVQGO
7. Патент № 2754226 С1 Российская Федерация, МПК В22F 9/08, В22F 9/14. Способ получения мелкодисперсного металлического порошка / Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Борисов Д. А., Розен А. Е. № 2020138344 ; заявл. 23.11.2020 ; опубл. 30.08.2021 ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». EDN: BPWMVY
8. Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Борисов Д. А. О повышении производительности установок для заготовки сырья порошковой металлургии // Техника и технология современных производств : сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Пенза, 12–13 апреля 2021 года). Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 34–37. EDN: ISMMLJ
9. Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Борисов Д. А. [и др.]. Установка для электродугового диспергирования тугоплавких материалов с активацией поверхности воздействием лазера на базе станка VTM // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Пенза, 1–3 июня 2023 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 97–102. EDN: SWUAIQ
10. Просветов В. В., Пророк Л. М. К вопросу о давлении пара на жидкость при испарении и конденсации. М. : Физико-энергетический институт, 1976. 20 с.
11. Fedkin A. V., Grossman L., Ghiorso Mark S. Vapor pressures and evaporation coefficients for melts of ferromagnesian chondrule-like compositions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70 (1). P. 206–223. doi: 10.1016/j.gca.2005.08.014
12. Zverovshchikov A., Tarantsev K., Borisov D. Determination of the parameters of the spray area during electric arc dispersion of the material // *Materials Today-Proceedings*. 2021. Vol. 38. P. 1452–1453. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08
13. Фокин И. В., Гудим Ю. А. Структура потерь металла в процессе выплавки нержавеющей стали // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2013. Т. 13, № 2. С. 33–37. EDN: RLYRTL
14. Макаров Г. Н. Экспериментальные методы определения температуры и теплоты плавления кластеров и наночастиц // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 2. С. 185. EDN: LKFJUT
15. Хардинов С. В. Разработка способа получения порошковых материалов путем электроэрозионного диспергирования шарикоподшипниковой стали : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2017. 193 с.
16. Агеев Е. В. Исследование и практическое применение порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.09. М., 2012. 35 с. EDN: QIISIB

References

1. Bayramov R.K. *Development of processes for obtaining highly dispersed powders during electrical erosion of metals in aqueous solutions*. DSc dissertation. Moscow, 2010:255. (In Russ.). EDN: QFDSIT
2. Dvornik M.I. *Development of physical-chemical and technological principles for processing tungsten-cobalt hard alloy by electrical discharge dispersion*. PhD dissertation. Khabarovsk, 2006:117. (In Russ.). EDN: NNWKOH
3. Zverovshchikov A.E., Kireev S.Yu., Rozen A.E. et al. *Formirovanie geterogennykh struktur v protsesse tsentrobezchno-dugovogo dispergirovaniya materialov na osnove karbida vol'frama = Formation of heterogeneous structures in the process of centrifugal-arc dispersion of materials based on tungsten carbide*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:158. (In Russ.). EDN: RONACM

4. Patent № 2746197 C1 Russian Federation, MPK B22F 9/10, B22F 9/14. *Sposob polucheniya melkodispersnogo poroshka tugoplavkogo materiala = Method for producing finely dispersed powder of refractory material.* Zverovshchikov A.E., Zverovshchikov V.Z., Kolmakov K.M., Borisov D.A. № 2020115605; appl. 11.05.2020; publ. 08.04.2021; applicant federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzenskiy gosudarstvennyy universitet». (In Russ.). EDN: CMAAQS
5. Pavlov V.P., Kudoyarova V.M. Mathematical modeling of the physical and chemical effect of sublimation process on the surface of heat-protective coating made of polymer composite material under intense high-temperature heating. *Reshetnev readings*. 2012;2:499–500. (In Russ.). EDN: UNKZWT
6. Goncharova L.M. *Sublimation crystallization of functional layers in micro-sized growth cells*. PhD dissertation. Novocherkassk, 2019:116. (In Russ.). EDN: RHVQGO
7. Patent № 2754226 C1 Russian Federation, MPK B22F 9/08, B22F 9/14. *Sposob polucheniya melkodispersnogo metallichesкого poroshka = Method for producing finely dispersed metal powder.* Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Borisov D.A., Rozen A.E. № 2020138344; appl. 23.11.2020; publ. 30.08.2021; applicant federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzenskiy gosudarstvennyy universitet». (In Russ.). EDN: BPWMVY
8. Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Borisov D.A. On increasing the productivity of installations for the procurement of raw materials for powder metallurgy. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennykh proizvodstv: sb. st. II Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (Penza, 12–13 aprelya 2021 goda) = Equipment and technology of modern production: proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference with international participation (April 12-13, 2021, Penza)*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:34–37. (In Russ.). EDN: ISMMLJ
9. Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Borisov D.A. et al. Installation for electro-laboratory dispersion of refractory materials with surface activation by laser action based on the VTM machine. *Aktual'nye problemy stanko-stroeniya – 2023: sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (Penza, 1–3 iyunya 2023 g.) = Current issues in machine tool construction – 2023: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (June 1-3, 2023, Penza)*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:97–102. (In Russ.). EDN: SWUAIQ
10. Prosvetov V.V., Prorok L.M. *K voprosu o davlenii para na zhidkosti pri isparenii i kondensatsii = On the issue of vapor pressure on liquid during evaporation and condensation*. Moscow: Fiziko-energeticheskiy institut, 1976:20. (In Russ.)
11. Fedkin A.V., Grossman L., Ghiorso Mark S. Vapor pressures and evaporation coefficients for melts of ferromagnesian chondrule-like compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006;70(1):206–223. doi: 10.1016/j.gca.2005.08.014
12. Zverovshchikov A., Tarantsev K., Borisov D. Determination of the parameters of the spray area during electric arc dispersion of the material. *Materials Today-Proceedings*. 2021;38:1452–1453. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08
13. Fokin I.V., Gudim Yu.A. Structure of metal losses in the process of smelting stainless steel. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: metallurgy*. 2013;13(2):33–37. (In Russ.). EDN: RLYRTL
14. Makarov G.N. Experimental methods for determining the temperature and heat of melting of clusters and nanoparticles. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in physical sciences*. 2010;180(2):185. (In Russ.). EDN: LKFJUT
15. Khardikov S.V. *Development of a method for obtaining powder materials by electro-erosive dispersion of ball bearing steel*. PhD dissertation. Bryansk, 2017:193. (In Russ.)
16. Ageev E.V. *Research and practical application of powders obtained by electrical discharge dispersion of waste tungsten-containing hard alloys*. DSc abstract. Moscow, 2012:35. (In Russ.). EDN: QIISIB

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовицков

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Aleksandr E. Zverovshchikov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Дмитрий Алексеевич Борисов

ведущий инженер кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: steerman70098@yandex.ru

Dmitry A. Borisov

Leading engineer of the
sub-department of technologies
and equipment of mechanical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 13.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025