

## Оценка величины интегральной температуры катода технологических вакуумных дуговых источников плазмы

<sup>1</sup>Иванов И. А.,

<sup>2</sup>Ковалевич Э. В.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Государственное учреждение «Белорусский институт системного

анализа и информационного анализа научно-технической сферы»,

г. Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Изготовление катода-мишени, подбор его химического состава, и установление оптимальной температуры нагрева для минимизации образования капельной фазы, являются важными условиями для получения покрытия с заданными свойствами.

В статье исследуется тепловой режим работы расходуемого водоохлаждаемого катода-мишени, изготовленного из различных материалов (*Al, Cu, Сталь 45, Ni, Ti, Mo*), вакуумных электродуговых источников плазмы. Кроме того, необходимо установить оптимальную температуру нагрева катода-мишени и предотвратить его от перегрева тем самым минимизировать образование капельной фазы. Проведен анализ температуры нагрева катода-мишени. Представлены рассчитанные значения критерия Био для подтверждения гипотезы равномерности распределения температуры по толщине катода.

Выбор оптимального состава катода-мишени и установление температуры его нагрева, позволяют получить покрытие с заданными свойствами, при этом образование капельной фазы будет минимальным. Такие покрытия могут в дальнейшем использоваться как в изделиях медицинского назначения, так и промышленного назначения.

*Ключевые слова:* катод, источник плазмы, вакуумная дуга, капельная фаза, теплопередача, дуговой разряд, поверхность, эродирующая поверхность катода.

## Assessment of the Integral Temperature of the Cathode of Technological Vacuum Arc Plasma Sources

<sup>1</sup>Igor A. Ivanou,

<sup>2</sup>Emma V. Kovalevich

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian Institute of System Analysis and Information Support

of Scientific and Technical Sphere, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The fabrication of the target cathode, the selection of its chemical composition, and the establishment of the optimal heating temperature to minimize the formation of the droplet phase are important conditions for obtaining a coating with the desired properties.

This article examines the thermal operating conditions of a consumable water-cooled target cathode made of various materials (*Al, Cu, Steel 45, Ni, Ti, Mo*) in vacuum arc plasma sources. Furthermore, it is necessary to establish the optimal heating temperature of the target cathode and prevent it from overheating, thereby minimizing the formation of the droplet phase. The heating temperature of the target cathode is analyzed. Calculated values of the Biot criterion are presented to confirm the hypothesis of uniform temperature distribution across the cathode thickness.

Selecting the optimal target cathode composition and establishing its heating temperature will enable the production of a coating with the desired properties while minimizing the formation of the droplet phase. Such coatings can be used in both medical and industrial applications.

*Keywords: cathode, plasma source, vacuum arc, droplet phase, heat transfer, arc discharge, surface, eroding surface of the cathode.*

## ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная ионно-плазменная обработка изделий с формированием на их поверхности защитных слоев широко используется для придания поверхности из этих материалов специальных свойств. В зависимости от состава катода-мишени, полученное покрытие позволит обеспечить материалу более высокие эксплуатационные характеристики. Перспективным направлением является получение катодов-мишней из сложнолегированных сплавов для ионно-плазменных испарительных систем. Получение качественного покрытия зависит от выбранного состава катода-мишени и его геометрии, при этом выбор состава и расчет режима водоохлаждаемого катода-мишени является ключевым фактором для получения качественных покрытий.

Объектом исследования является катод-мишень, изготовленный из различных материалов (Al, Cu, Сталь 45, Ni, Ti, Mo). Состав катода-мишени влияет на свойства покрытия. Так, например, медь обладает высокой коррозионной стойкостью, Сталь 45 – твердостью и долговечностью, никель – высокой коррозионной стойкостью и температурной устойчивостью, титан – высокой прочностью при низкой плотности, коррозионной стойкостью и особенностью образовывать твердые и долговечные покрытия.

Предметом исследования является тепловой режим работы расходуемого водоохлаждаемого катода-мишени, изготовленного из различных материалов (Al, Cu, Сталь 45, Ni, Ti, Mo), вакуумных электродуговых источников плазмы.

Цель исследования – анализ теплового режима расходуемого водоохлаждаемого катода-мишени вакуумных электродуговых источников плазмы и определение оптимальных режимов его работы. Установить оптимальную температуру нагрева катода-мишени и предотвратить от перегрева тем самым минимизировать образование капельной фазы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Вакуумные дуговые источники плазмы постоянного тока характеризуются высокой скоростью нанесения покрытий, простотой управления и сравнительно низкой стоимостью оборудования [1]. Рабочий ток непрерывного вакуумного дугового разряда составляет от 40 до 150 А. Нижний предел диапазона тока дуги определяется самопроизвольным гашением дугового разряда, тогда как верхний предел определяется необходимостью охлаждения поверхности эрозии катода-мишени. В принципе, конструкция дугового испарителя допускает работу с током дуги намного выше 150 А. Это приводит к

пропорционально более высокому производству плазмы и, соответственно, скорости осаждения, но вызывает проблемы с охлаждением катодного узла источника плазмы и подложки, увеличением стоимости источника питания и повышением содержания в покрытиях микрочастиц, состоящих из катодного материала.

Так как процесс горения дуги протекает в вакууме при давлении порядка  $10^{-2}$  Па и ниже, то для поддержания процесса горения дуги в окружающей катод газовой среде недостаточно материала. Дуга горит в парах материала катода, которые образуются при эрозионном испарении катода в быстро и хаотично перемещающихся катодных пятнах вакуумной дуги. Размер катодных пятен составляет  $10^{-6}$  м. За счет малой площади пятен концентрация тока в них достигает  $10^9$  А/см<sup>2</sup> [2]. Происходит быстрый нагрев микрообъема поверхностного слоя катода (по оценкам [3], температура в зоне катодного пятна достигает  $10^4$  К), который испаряется в доли секунды с последующей ионизацией паров материала катода. Процесс сопровождается образованием большого количества капельной фазы, присутствие которой в покрытии не всегда желательно.

Количество капельной фазы в составе плазменного потока зависит от температуры поверхности катода, которая определяется величиной тока дугового разряда, геометрией катода-мишени и эффективностью отвода тепла от эродирующей поверхности катода. В [4] на примере катодов из титана марки ВТ-1 показано, что увеличение длины цилиндрического катода от 15 до 50 мм сопровождается увеличением температуры его поверхности с 330 °С до 800 °С. При этом скорость эрозии возрастает в 2 раза (с  $3,9 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл до  $7,6 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл, соответственно).

При выборе размеров катода учитывается не только компоновка и принятая схема охлаждения катодного узла [5]. Размеры катода зависят от максимально возможной концентрации ионов ( $n_{iK}$ ) и, следовательно, плотности тока ( $j_K$ ) на поверхности катода. При расчете предельного тока дугового разряда, при котором не наблюдается перегрев расходуемой части катода, необходимо учитывать, что доля ионного тока, приходящегося на поверхность упрочняемой заготовки, не должна превышать допустимой величины. Эта величина ограничивается предельной токовой нагрузкой на поверхность обрабатываемой заготовки.

В [6] расчет проводили для разных значений высот катода:  $h_K$  от 0,02 до 0,05 м и диаметра катода-мишени 0,08 м. В качестве материалов катода рассматривались Ti, TiSi, сталь 40Х13. Были приняты

следующие расчетные данные: средний заряд иона  $Z_i$  (для титановой плазмы +1,6, для плазмы титан-кремний +1,2); заряд электрона  $1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл; скорость движения иона  $v_i = 2 \cdot 104$  м/с;  $U_k = 12$  В;  $T_{\text{п}} = 550$  °К;  $T_o = 350$  °К; Получено, что при малых толщинах расходуемой части катода-мишени вакуумного электродугового источника плазмы ( $h_k$ ), ток допустимого разряда может быть значительным и обеспечивать высокую производительность процесса нанесения покрытий при образовании относительно низкого количества капельной фазы в покрытии. Так, для исследованных материалов, при  $h_k = 0,05$  м величина предельно допустимого тока дугового разряда, обеспечивающего формирование в потоке минимального количества капельной фазы, практически равна величине минимального тока устойчивого горения дуги. Следовательно, при больших толщинах катода избежать перегрева эродирующей поверхности и, как следствие, увеличения капельной фазы в потоке нельзя, так как для поддержания устойчивого разряда требуется установить величину разрядного тока существенно выше величины минимального тока устойчивого горения дуги.

Кроме того, температура эродирующей поверхности катода, которая зависит от величины разрядного тока, переносимого через единицу площади эродирующей поверхности катода ( $F_k$ ), основная характеристика, определяющая механизм эрозионного испарения – термоэмиссионный или взрывоэмиссионный.

В статье исследуется тепловой режим работы расходуемого водоохлаждаемого катода вакуумных электродуговых источников плазмы.

Для анализа теплового режима работы катода сделаем следующие допущения. Рассматриваем теплопередачу через катод как теплопередачу через плоскую стенку. Процесс идет в вакууме (давление в рабочей камере ниже  $10^{-2}$  Па), то конвективного теплообмена с окружающей средой (средой технологического газа) на боковой поверхности катода-мишени не происходит. Учитывая, что процесс эрозионного испарения под действием дугового разряда протекает на интегрально холодном катоде (то есть при температурах ниже температуры красного свечения), то считаем, что при данных температурах катода теплопотери излучением с поверхности катода можно пренебречь. В установившемся режиме работы катода основным механизмом теплопередачи являются:

1. Кондуктивная теплопередача через тело катода, интенсивность которой зависит от величины температурного напора между охлаждаемой и испаряемой торцевыми поверхностями катода  $\Delta T$  и термического сопротивления материала катода  $h_k / \lambda_k$ , где  $h_k$  – толщина расходуемой части катода,  $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности катодного материала;

2. Теплообмен между потоком охлаждающей воды и катодом. Процесс описывается законом Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha \cdot (T_{CT2} - T_{\mathcal{K}}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $T_{CT2}$  – температура охлаждаемого торца катода,  $T_{\mathcal{K}}$  – температура воды (в расчетах принято 30 °C).

Скорость течения охлаждающей воды ( $w$ ) в системах водоподготовки, также как и в трубах водоснабжения, равна  $w = 0,8$  м/с. Кинематическая вязкость воды при 30 °C и давлении 0,1 МПа:  $\nu = 0,801 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, число Прандтля  $Pr = 3,56$  [7]. Считаем, что сила тяжести не влияет на характер течения воды в трубах водоохлаждения катодного узла. В таком случае число Рейнольдса  $Re = 10^3$ , что соответствует ламинарному режиму течения воды.

При ламинарном режиме течения коэффициент теплообмена водного потока с охлаждаемым торцом катода-мишени связан с числом Нуссельта ( $Nu$ ) соотношением:  $\alpha = (Nu \cdot \lambda_{\text{воды}})/l$ , где  $l$  – диаметр омываемой поверхности  $l = 10^{-1}$  м, а число Нуссельта рассчитывается по формуле [7]:

$$Nu = 1,55 \cdot (Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l})^{0,33},$$

где  $d$  – диаметр трубы водоохлаждения,  $d = 10^{-2}$  м. Для воды (при температуре 30 °C)  $\lambda_{\text{воды}} = 0,618$  Вт/(м · °C).

Тогда,  $\alpha = 66,435$  Вт/(м<sup>2</sup> · °C).

В стационарном тепловом режиме работы катодного узла количество тепла отводимого от охлаждаемого торца катода-мишени (уравнение 1) равно количеству тепла передаваемого через толщину расходуемой части катода-мишени вакуумного электродугового источника плазмы  $h_k$ :

$$q = (T_{CT1} - T_{CT2}) \cdot \frac{\lambda_k}{h_k}, \quad (2)$$

где  $T_{CT1}$  – интегральная температура поверхности эрозии катода.

Приравнивая уравнения 1 и 2 получим выражение для определения температуры водоохлаждаемого конца катода:

$$T_{CT1} = T_{\mathcal{K}} + q \cdot \left( \frac{l}{\alpha} + \frac{h_k}{\lambda_k} \right). \quad (3)$$

Прежде чем воспользоваться уравнением 3 определим величину числа Био, который характеризует отношение сопротивления теплопередачи внутри тела катода к сопротивлению теплообмена с окружающей средой (в данном случае с потоком охлаждающей воды). Для расчетов возьмем титановый катод с толщиной расходуемой части  $h_k = 0,05$  м и

величиной теплопроводности  $\lambda_K = 385,4 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ . Тогда:

$$Bi = (h_K \cdot \alpha) / \lambda_K = 8,6 \cdot 10^3 << 0,01. \quad (4)$$

Таким образом температура по толщине катода будет распределена равномерно. Скорость нагрева и конечная температура катода зависят только от интенсивности теплоотдачи. Процесс выравнивания температуры в теле катода происходит более интенсивно, чем отвод тепла с его охлаждаемой поверхности. Без учета потерь тепла излучением можно считать, что в стационарном режиме работы дугового испарителя весь катод будет иметь одну и ту же интегральную температуру, то есть  $T_{CTI} = T_{CTr}$ .

Оценим температуру нагрева катодов, изготовленных из разных материалов. Для этого воспользуемся уравнением 3, в котором введем обозначение:  $\Delta T = T_{CTI} - T_{\text{ж}}$ . Для расчета примем величину тока дугового разряда  $I_{\text{дыги}} = 70 \text{ А}$ . Необходимо учесть,

что на нагрев катода идет не более 0,3 выделяемого тепла при дуговом разряде [3]. Площадь эродирующей (торцевой) поверхности катода радиусом 0,08 м равна  $S = 0,005 \text{ м}^2$ .

Тогда:

$$q = U_K \cdot I_{\text{дыги}} \cdot 0,3/S, \quad (5)$$

где падение напряжения на катоде  $U_K = 0,4 \cdot (U_{\text{дыги}} - \varphi_e)$  [5].

Работа выхода электрона ( $\varphi_e$ ) зависит от выбранного материала катода [9]. Для большинства материалов напряжение дугового разряда  $U_{\text{дыги}} = 20 \dots 30 \text{ В}$ . Для расчета принимаем величину напряжения дугового разряда равной 25 В.

Результаты расчетов сведены в таблицу 1. В таблице также приведены рассчитанные значения критерия Био для подтверждения гипотезы равномерности распределения температуры по толщине катода.

**Таблица 1 – Результаты расчетов температуры нагрева катодов, изготовленных из разных материалов**

**Table 1 – Results of calculations of the heating temperature of cathodes made of different materials**

Материал катода	$\lambda_K, \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$ [8]	Число $Bi = \frac{h_K \cdot \alpha}{\lambda}$	$\varphi_e, \text{эВ}$	$U_K, \text{В}$	$q_K, \text{Вт}/\text{м}^2$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Температура плавления материала, $^\circ\text{C}$
	$h_K / \lambda_K$						
Al	$\frac{231}{2,16 \cdot 10^{-4}}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	4,16	8,336	35011	525	660
Cu	$\frac{385,8}{1,3 \cdot 10^{-4}}$	$8,63 \cdot 10^{-3}$	4,81	8,076	33919	509	1085
Сталь 45	$\frac{54,5}{9,17 \cdot 10^{-4}}$	$6,09 \cdot 10^{-2}$	4,8	8,08	33936	539	1535
Ni	$\frac{75,65}{6,6 \cdot 10^{-4}}$	$4,38 \cdot 10^{-2}$	5,2	7,92	33264	521	1455
Ti	$\frac{21,05}{2,38 \cdot 10^{-3}}$	0,158	4,33	8,268	34725	603	1680
Mo	$\frac{125,5}{3,95 \cdot 10^{-4}}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	4,66	8,136	34171	525	2620

Как показывают расчеты, интегральная температура катода  $T_{CTI}$  для всех рассматриваемых материалов около  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  кроме титана. Интегральная температура катода влияет на эрозию катода, особенно в дуговых разрядах. При повышении интегральной температуры катода увеличивается давление насыщенных паров катодного вещества, что приводит к экспоненциальному росту скорости термического испарения что способствует увеличению эрозии. Баланс температуры катода важен для оптимизации его износа и работоспособности:

слишком низкая температура снижает воздействие, слишком высокая – резко увеличивает эрозию из-за испарения материала и изменения микроструктур поверхности.

Отличие титана и его сплавов от других выбранных металлов и стали связано с его низкой теплопроводностью [10]. Рассчитанные значения чисел Био, для принятых условий теплообмена, меньше 0,01 для всех материалов кроме титана. По всей вероятности, на титановых катодах будет наблюдаться наличие существенного градиента температуры в на-

правлении от поверхности эрозии до поверхности охлаждения. Не смотря на высокие температуры, достигаемые в зоне катодного пятна, интегральная температура катода остается относительно низкой. Этой температуры недостаточно для обеспечения высокого эмиссионного тока электронов с эродирующей поверхности катода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетов температуры нагрева катода-мишени, изготовленного из различных материалов, интегральная температура находится в диапазоне 500 °C до 605 °C за исключением титана. Таким образом, без учета потерь тепла излучением можно считать, что в стационарном режиме работы дугового испарителя весь катод-мишень будет иметь одну и туже интегральную температуру. Не смотря на высокие температуры, достигаемые в зоне катодного пятна, интегральная температура катода остается относительно низкой (порядка 500 °C). Этой температуры недостаточно

для обеспечения высокого эмиссионного тока электронов с эродирующей поверхностью катода.

Однако, сильный ток с эродирующей поверхностью вызывает быстрое разрушение и переход материала катода-мишени в плазменное состояние, что приводит к возникновению тока высокой плотности, что вызывает взрывные воздействия электронов. Взрывные воздействия электронов вызывают мощное искрообразование и перегрев материала поверхности, приводя к быстрому испарению, плавлению и эрозии катода-мишени. Оптимальной температурой поверхности катодного пятна в вакуумных дугах и разрядах является температура металла, из которого изготовлен катод-мишень, что обеспечивает достаточную теплоотдачу и испарение материала.

С учетом соблюдения всех критериев возможность получения качественного покрытия с заданными свойствами возрастает, что позволит обеспечить в дальнейшем его использование как для изделий медицинского назначения, так и других отраслях обрабатывающей промышленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мрочек, Ж. А. Современное состояние исследований плазменных жаростойких и упрочняющих покрытий в области вакуумно-плазменных жаростойких и упрочняющих покрытий / Ж. А. Мрочек, И. А. Иванов, В. А. Соколовский // Весці НАНБ. Серія фізіка-технічних наук. – 2002. – № 3. – С. 121.
2. Иванов, И. А. Пути совершенствования вакуумных источников плазмы для упрочняющей обработки сталей и сплавов в машиностроении / И. А. Иванов // Материалы междунар. науч. конф. «Инновации направленные на экономию энергии и ресурсов в области литья и обработки металлов», Ташкент, 21 – 23 мая 2025. – Ташкент. – С. 14–15.
3. Парфенов, А. Г. Теоретические исследования вакуумных дуг / А. Г. Парфенов // Известия томского политехнического университета. – 2000. – Том 303(3). – С. 105 – 117. [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3204/1/bulletin\\_tpu-2000-303-3-11.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3204/1/bulletin_tpu-2000-303-3-11.pdf).
4. Хороших, В. М. Эрозия катода и расход массы катодного материала в стационарной дуге низкого давления/ В. М. Хороших // Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Том 2. – № 4. – С. 184 – 199. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/551c78fd-c040-44fe-bca1-f201ac8d263b/content>.
5. Иванов, И. А. Комплексный подход к решению технологической задачи получения катодов-мишней из силицидов металлов для вакуумных ионно-плазменных источников / И. А. Иванов,
6. А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт, А. Н. Белый // Литъё и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 83 – 90. DOI: 10.21122/1683-6065-2022-3-83-90.
7. Иванов, И. А. Влияние геометрических размеров катода вакуумного электродугового испарителя плазмы на величину допустимого тока дугового разряда / И. А. Иванов, Е. О. Нарушко // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 25–29. <https://sat.bntu.by/jour/article/view/821/812>.
8. Маршалова, Г. С. Свободно-конвективный теплообмен на круглоребристых трубах и пучках из них / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Том 96. – № 4. – С. 1091–1105.
9. Поуэл, Р. Наиболее важные результаты в изучении теплопроводности металлов / Р. Поуэл // Успехи физических наук. – 1971. – Том 105(2). – С. 329–351.
10. Трофимов, А. И. Физические основы эмиссии электронов в металлах при нагреве и воздействии ультразвука // Вестник Российской академии естественных наук. – 2014. – № 4. – С. 21–25 <https://raen.info/upload/000/vestnik/2014/4/21-25.pdf>.
11. Baltatu, M.S. Chiriac-Moruzzi C, Vizureanu P. Effect of heat treatment on some titanium alloys used as biomaterials [Electronic resource] / M. S. Baltatu, C. Chiriac-Moruzzi, P. Vizureanu // Applied sciences. – 2022. – Vol. 12(21). – 11241. Available from: file:///C:/Users/User/Downloads/applesci-12-11241.pdf. Accessed: 19 November 2025. DOI: 10.3390/app122111241.

## REFERENCES

1. Mrochek ZhA, Ivanov IA, Sokolovsky VA. Current state of research on plasma heat-resistant and hardening coatings in the field of vacuum-plasma. *Vestsi NANB. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series.* 2002;(3):121. (In Russ.)
2. Ivanov IA. Ways to improve vacuum plasma sources for hardening treatment of steels and alloys in mechanical engineering. In: Materialy mezhdunar. nauch. konf. «Innovatsii napravlennye na ekonomiyu energii i resursov v oblasti lit'ya i obrabotki metallov» = Proceedings of the international scientific conference «Innovations aimed at saving energy and resources in metal casting and processing», May 21-23, 2025, Tashkent; 2025:14-15. (In Russ.)
3. Parfenov A.G. Theoretical studies of vacuum arcs. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Tomsk Polytechnic University.* 2000;(303(3):105 – 117. [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3204/1/bulletin\\_tpu-2000-303-3-11.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3204/1/bulletin_tpu-2000-303-3-11.pdf). (In Russ.)
4. Khoroshikh VM. Cathode erosion and mass consumption of cathode material in a stationary low-pressure. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti = Physical Surface Engineering.* 2004;2(4):184-199. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/551c78fd-c040-44fe-bca1-f201ac8d263b/content>. (In Russ.)
5. Ivanov IA, Slutsky AG, Sheinert VA, Bely AN. An integrated approach to solving the technological problem of obtaining metal silicide target cathodes for vacuum ion-plasma sources. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* 2022;(3):83–90. DOI: 10.21122/1683-6065-2022-3-83-90. (In Russ.)
6. Ivanov IA, Narushko EO. Influence of vacuum arc plasma evaporator cathode geometry of on value of admissible arc discharge current. *Nauka i tekhnika. Seriya 1. Mashinostroenie = Science & Technique. Series 1. Mechanical engineering.* 2015;(3):25-29. <https://sat.bntu.by/jour/article/view/821/812>. (In Russ.)
7. Marshalova GS, Sukhotsky AB, Kuntysh VB. Free convection heat transfer on annular-finned tubes and bundles thereof. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal = Journal of engineering physics and thermophysics.* 2023;96(4):1091-1105. (In Russ.)
8. Powell R. The most important results in the study of thermal conductivity of metals. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences.* 1971;105(2): 329-351. (In Russ.)
9. Trofimov AI. Physical principles of electron emission in metals during heating and exposure to ultrasound. *Vestnik Rossijskoj akademii estestvennyh nauk.* 2014;4:21-25. <https://raen.info/upload/000/vestnik/2014/4/21-25.pdf>. (In Russ.)
10. Baltatu MS, Chiriac-Moruzzi C, Vizureanu P. Effect of heat treatment on some titanium alloys used as biomaterials. *Applied Sciences.* 2022;12(21):11241. Available from: file:///C:/Users/User/Downloads/applesci-12-11241.pdf [Accessed 19 November 2025]. DOI: 10.3390/app122111241.

## Сведения об авторах

**Иванов Игорь Аркадьевич**

Доктор технических наук, профессор, декан механико-технологического факультета Белорусского национального технического университета, г. Минск, Республика Беларусь

*E-mail:* deanmtf@bntu.by

**Ковалевич Эмма Владимировна**

Научный сотрудник отдела научно-методического обеспечения инновационного развития государственного учреждения «Белорусский институт системного анализа и информационного анализа научно-технической сферы», г. Минск, Республика Беларусь

*E-mail:* kavalevich@belisa.org.by, 2113emma@gmail.com

## Information about the authors

**Igor A. Ivanou**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Technology of Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

*E-mail:* deanmtf@bntu.by

**Emma V. Kovalevich**

Research fellow, Department of Scientific and Methodological Support for Innovative Development, Belarusian Institute of System Analysis and Information Support of Scientific and Technical Sphere, Minsk, Republic of Belarus

*E-mail:* kavalevich@belisa.org.by, 2113emma@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.11.2025.