

УДК 669.018.25

doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-50-57

# Определение параметров гетерогенной среды мишени при центробежно-дуговом диспергировании твердых сплавов

К.М. Колмаков<sup>1</sup>, А.Е. Зверовщиков<sup>1</sup>, А.Г. Схиртладзе<sup>2</sup>, А.В. Соколов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет

<sup>2</sup> МГТУ Станкин

## Determination of the Parameters of the Target Heterogeneous Medium During Centrifugal Arc Dispersion of Hard Alloys

K.M. Kolmakov<sup>1</sup>, A.E. Zverovshchikov<sup>1</sup>, A.G. Skhirtladze<sup>2</sup>, A.V. Sokolov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Penza State University

<sup>2</sup> Moscow State Technical University "Stankin"

Рассмотрены баллистические параметры траектории частиц сплавов с высокой плотностью при перемещении в газовой среде, сопровождающемся фазовым переходом материала частиц. Разработана методика определения параметров мишени в зависимости от физико-механических характеристик материалов улавливаемых частиц и слоев мишени. Определена возможность сохранения сфероидальной формы частиц при электродуговом диспергировании сплавов с высокой плотностью.

**Ключевые слова:** электродуговое диспергирование, твердые сплавы, кристаллизация частицы, баллистический коэффициент, механизм внедрения

The article considers the ballistic parameters of the trajectories of high-density alloy particles moving in a gaseous medium, accompanied by a phase transition of the of the particle material. A technique has been developed for determining the parameters of the target depending on the physical and mechanical characteristics of the materials of the captured particles and target layers. The possibility of maintaining the spheroidal shape of particles during the electric arc dispersion of high-density alloys has been determined.

**Keywords:** electric arc dispersion, hard alloys, particle crystallization, ballistic coefficient, penetration mechanism

Получение порошковых материалов твердого сплава с заданными размерами, формой и структурой частиц является одной из технологических задач, определяющих возможность производства качественного инструментального материала [1]. Методы изготовления нанопорошков весьма разнообразны. В литературе

приведено около десяти классификаций этих методов по разным физическим и химическим принципам [2].

К перспективным методам получения нанопорошков с требуемыми характеристиками частиц относится электродуговое диспергирование материалов [3, 4]. Известна технология [5],

\* Работа выполнена в рамках проекта № 0748-2020-0013 «Научные основы формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (Государственное задание Пензенского государственного университета в области научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ).

в которой электродуговое плавление сочетается с распылением расплава центробежными силами. Чтобы ее усовершенствовать, необходимо разработать теоретические предпосылки динамики движения капли расплава после отрыва от электрода.

Цель работы — научное обоснование физико- и теплотехнических характеристик конструкции ловушки-мишени частиц устройства электродугового диспергирования тяжелых и твердых сплавов.

Формирование структуры частицы в процессе фазового перехода является функцией динамических параметров свободного полета капли и термодинамических свойств среды. Аппаратную реализацию технологии нельзя успешно выполнить без расчета основных параметров фазы полета частицы, так как необходимо обеспечить требуемые скорости кристаллизации и встречи частицы расплава с мишенью.

Для этого надо обоснованно определить допустимое расстояние от точки диспергирования до мишени, скорость встречи капли расплава с мишенью, площадь мишени, ее толщину и механические характеристики. Эти параметры и будут определять конструктивные характеристики установки.

Расстояние до мишени должно быть минимальным, но не меньше, чем путь, необходимый для кристаллизации поверхности капли расплава в газовом потоке. Поэтому принято допущение, что с мишенью взаимодействует твердая частица, имеющая определенные механические характеристики, при температуре, граничащей с температурой фазового перехода.

В материале мишени происходит охлаждение, фиксация и концентрирование частиц. Материал мишени должен не только обеспечивать охлаждение частиц, но и предотвращать их агрегацию, вследствие чего масса мишени зависит от теплофизических характеристик материала и ожидаемого количества частиц дисперсной фазы. Общее количество поглощаемого тепла является функцией температурного интервала охлаждения теплоемкостей и теплот фазовых переходов взаимодействующих веществ.

Учитывая известную кинематику процесса и задавая некоторые размеры реальной аппаратной части, можно принять при центробежном эрозионно-дуговом синтезе начальную скорость капли в диапазоне 140...250 м/с [5].

Рассматривая фазу свободного полета капли, примем следующие допущения: плотность га-

зовой среды (воздуха)  $\rho_b$  вдоль траектории постоянна, влияние силы тяжести пренебрежимо мало, площадь миделя частицы в полете неизменна, коэффициент лобового сопротивления  $C_x$  зависит от скорости частицы.

При этом путь, пройденный частицей в газовой среде до мишени, достаточен для теплообмена, обеспечивающего полную кристаллизацию материала во всем объеме капли. Температура частицы при встрече с мишенью будет ниже температуры плавления.

Основной характеристикой формы частицы, перемещающейся по баллистической траектории в газовой среде, будем считать безразмерный параметр формы [6]

$$\Phi = \frac{S}{V^{2/3}},$$

где  $S$  — средний мидель частицы (математическое ожидание площади проекции тела на плоскость, нормальную к направлению полета);  $V$  — объем частицы.

Для сферы независимо от размера  $\Phi = 1,21$ .

Уравнение движения частицы приобретает вид

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_b v^2}{2} S C_x, \quad (1)$$

где  $m$  — масса частицы;  $v$  — текущая скорость частицы;  $t$  — время.

Используя понятие баллистического коэффициента  $A_6$ ,  $m^{-1}$ , это уравнение можно представить в виде

$$\frac{dv}{dt} = -A_6 v^2. \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2) при начальной скорости движения частицы  $v_0$  в системе координат, ноль которой находится в точке отрыва капли  $x(0) = 0$ , имеем

$$v = \frac{v_0}{1 + A_6 v_0 t}; \quad x = \frac{1}{A_6} \ln(1 + A_6 v_0 t).$$

Наибольший интерес для проектирования аппаратной реализации процесса представляет зависимость снижения скорости частицы от пройденного расстояния  $x$ . Используя замену  $dv/dt = dv/dx$ ,  $dx/dt = v dv/dx$  и интегрируя выражение для скорости с начальным условием  $v(0) = v_0$ , получаем

$$v = v_0 e^{-A_6 x}. \quad (3)$$

Эта формула определяет закон затухания скорости тела в баллистическом полете.

Баллистический коэффициент представим как

$$A_6 = \frac{\rho_B C_x \Phi}{2\rho_{сф}^{2/3} m^{1/3}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{сф}$  — плотность материала сфероидальной частицы.

Принимая плотности воздуха  $\rho_B$  и карбида вольфрама  $\rho_{сф}$  равными 1,29 и 15 600 кг/м<sup>3</sup> соответственно, получаем из выражения (1) зависимость коэффициента лобового сопротивления от скорости движения частицы

$$C_x = \begin{cases} 0,5 & \text{при } v \leq 150 \text{ м/с;} \\ \frac{1}{1,49 + 0,51 \sin(860^\circ - 350^\circ \lg v)} & \text{при } 550 \geq v > 150 \text{ м/с;} \\ 0,865(1 + 50/v) & \text{при } v > 550 \text{ м/с.} \end{cases}$$

Для дальнейших расчетов в диапазоне скорости движения частицы  $v = 180 \dots 250$  м/с (рис. 1) с небольшой погрешностью можно принять коэффициент лобового сопротивления  $C_x = 0,55$ .

Конечная скорость движения сфероидальной частицы зависит от начальной скорости схода капли, размера частицы  $d_{ш}$  и расстояния от точки отрыва до преграды  $x$  (рис. 2).

Значения скорости движения сфероидальной частицы при различном удалении от точки отрыва  $x$  приведены в табл. 1.

Скорость встречи сфероидальной частицы с мишенью (наряду с другими критически действующими факторами) определяет степень деформации или разрушения частицы. Параметрами процесса встречи являются глубина

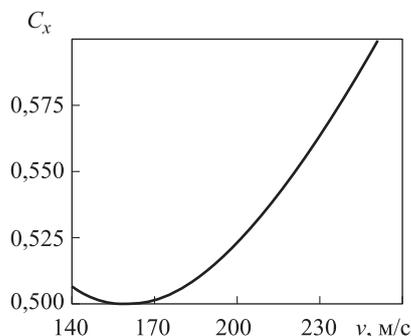


Рис. 1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления  $C_x$  от скорости движения частицы  $v$

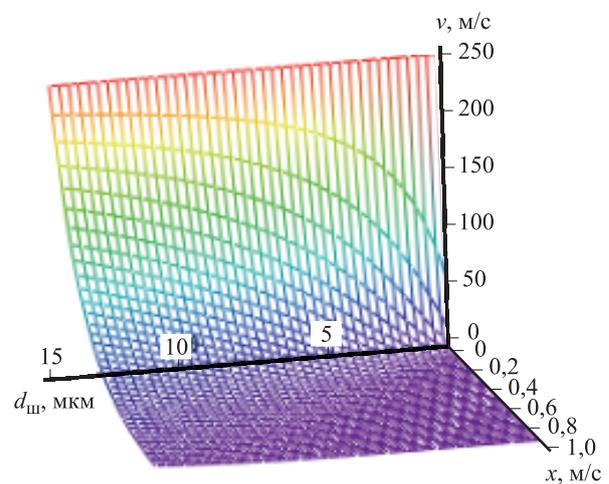
внедрения в полубесконечную преграду  $L_\infty$  или толщина предельно пробиваемой конечной преграды  $h_{пр}$ .

Эти величины связаны соотношением

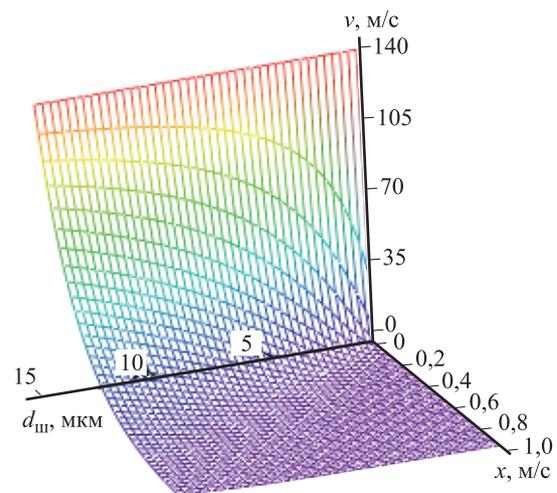
$$h_{пр} = yL_\infty \quad (y > 1),$$

где  $y$  — коэффициент, учитывающий вспомогательное действие тыльных эффектов при пробитии (коэффициент конечности преграды).

В зависимости от скорости удара и соотношения свойств ударника и преграды частица при внедрении может сохранять форму, либо претерпевать разнообразные деформации [6, 7]. Известны аэродинамический, переходный и кратерный механизмы внедрения частицы.



а



б

Рис. 2. Зависимости скорости движения сфероидальной частицы от ее размера  $d_{ш}$  и расстояния от точки отрыва до преграды  $x$  при начальной скорости схода капли  $v_0 = 250$  м/с (а) и 140 м/с (б)

**Таблица 1**  
Значения движения сфероидальной частицы при различном удалении от точки отрыва

$v_0, \text{ м/с}$	$d_{ш}, \text{ мкм}$	$x, \text{ м}$		
		0,1	0,5	1,0
250	10	140,00	13,60	0,74
	1	0,74	0,00	0,00
140	10	78,00	7,60	0,41
	1	0,41	0,00	0,00

Вид механизма определяется скоростью частицы и параметром соударяемой пары

$$P = \frac{\rho_{уд}}{\rho_{пр}} e^{\frac{\sigma_{уд} - \sigma_{пр}}{\sigma_{уд}}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{уд}$  и  $\rho_{пр}$  — плотность ударника и преграды соответственно;  $\sigma_{уд}$  и  $\sigma_{пр}$  — предел текучести ударника и преграды соответственно.

Виды механизмов внедрения [6] показаны на плоскости параметров  $P - v_0$  [2] (рис. 3).

Чтобы получить частицу с формой, близкой к сфероидальной, необходимо обеспечить аэродинамический механизм внедрения. Расчетные значения параметров соударяемой пары для принятых ранее исходных параметров и некоторых материалов среды мишени [8–13] приведены в табл. 2. Анализ расчетных данных, свидетельствует об обеспечении аэродинамического механизма внедрения.

При аэродинамическом механизме внедрения частица сохраняет целостность и входит в преграду на глубину, которая определяется совокупностью указанных факторов.

При проникновении частицы в сплошную среду ее движение описывается законом Ньютона

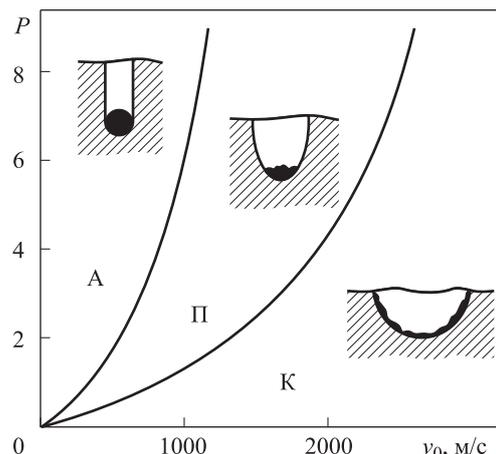


Рис. 3. Зоны аэродинамического (А), переходного (II) и кратерного (К) механизмов внедрения на плоскости параметров  $P - v_0$

$$m \frac{dv}{dt} = -F, \quad (6)$$

где  $F$  — сила сопротивления среды.

Предполагаем, что силу сопротивления среды можно представить в виде [3]

$$F = F_1 + F_2 + F_3, \quad (7)$$

где  $F_1$  — сила динамического (инерционного) сопротивления;  $F_2$  — сила вязкого сопротивления;  $F_3$  — сила статического сопротивления, характеризуемая прочностью среды.

В выражении (7):

$$F_1 = \frac{\rho_{пр} v^2}{2} S C_x;$$

$$F_2 = C_x \eta d_{ш} v \text{ (для сферы } F_2 = 3\pi \eta d v \text{);}$$

$$F_3 = C_x S \sigma_{ср.сж},$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость среды;  $\sigma_{ср.сж}$  — предел прочности среды на сжатие.

Таблица 2

Расчетные значения параметров соударяемой пары

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел текучести, МПа	Динамическая вязкость, Па·с	Параметр соударяемой пары $P$
WC-WC <sub>2</sub>	15 600	–	3330	–	–
Al	2700	420,00	50...120	12,5 · 10 <sup>4</sup>	15,5...15,2
Высокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ	910...970	100,00	30	43,8'	44,7
Вода	1000	1,82 (лед)	1 · 10 <sup>-6</sup>	1,0 · 10 <sup>-3</sup>	42,4

\* Параметр рассчитан исходя из структуры полимера [9].

Представим уравнение (6) в следующем виде:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_{\text{пр}} v^2}{2} S C_x - 3\pi d_{\text{ш}} \eta v - C_x S \sigma_{\text{пр.сж}},$$

где  $\sigma_{\text{пр.сж}}$  — предел прочности преграды на сжатие.

Введем постоянные

$$A = \frac{\rho_{\text{пр}} S C_x}{2m}; \quad B = \frac{3\pi d_{\text{ш}} \eta}{m}; \quad C = \frac{C_x S \sigma_{\text{пр.сж}}}{m}. \quad (8)$$

Подставим в уравнение (7) постоянные из выражения (8) и проведем замену  $dv/dt = v dv/dx$ . Тогда

$$\frac{v dv}{dx} = -A v^2 - B v - C.$$

Разделяя переменные и интегрируя в пределах при  $x=0$ ,  $v=v_b$ ;  $x=L_{\text{пр}}$ ,  $v=0$  ( $v_b$  — скорость встречи шарика с преградой;  $L_{\text{пр}}$  — предельная глубина проникновения частицы в преграду), меняя пределы интегрирования, имеем

$$L_{\text{пр}} = \frac{\ln[v(Av+B)+C]}{2A} \Big|_{v_b=0} - \frac{2B \operatorname{arctg} \frac{2Av+B}{\sqrt{4AC-B^2}}}{\sqrt{4AC-B^2}} \Big|_{v_b=0}. \quad (9)$$

Подставляя в выражение (9) значения скорости встречи в интервале от  $v_b$  до 0, получаем конечное уравнение для расчета глубины предельного проникновения частицы в преграду

$$L_{\text{пр}} = \frac{\ln[v_b(Av_b+B)+C] - \frac{2B \operatorname{arctg} \frac{2Av_b+B}{\sqrt{4AC-B^2}}}{\sqrt{4AC-B^2}}}{2A} - \frac{2B \operatorname{arctg} \frac{B}{\sqrt{4AC-B^2}}}{\sqrt{4AC-B^2}}. \quad (10)$$

С учетом сфероидальной формы частицы и плотности материала — карбида вольфрама ( $\rho_{\text{сф}} = 15\,600 \text{ кг/м}^3$ ) постоянные уравнения проникания частицы в материал мишени (8) приобретают вид

$$A = \frac{3\rho_{\text{пр}} C_x}{4\rho_{\text{сф}} d}; \quad B = \frac{18\eta}{\rho_{\text{сф}} d_{\text{ш}}^2}; \quad C = \frac{3C_x \sigma_{\text{пр.сж}}}{4\rho_{\text{сф}} d}. \quad (11)$$

Результаты расчета по уравнению (10) глубины предельного проникновения сфероидальной частицы карбида вольфрама в преграду (высокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ и дистиллированную воду) при скорости встречи  $v_b = 10 \dots 140 \text{ м/с}$  и диаметре  $d_{\text{ш}} = 1 \dots 15 \text{ мкм}$  приведены на рис. 4.

Для высокомолекулярного полиэтилена СВМПЭ при скорости встречи  $v_b = 140 \text{ м/с}$  и диаметре сфероидальной частицы  $d_{\text{ш}} = 10 \text{ мкм}$  расчетная глубина ее предельного проникновения в преграду  $L_{\text{пр}} = 617 \text{ нм}$ , для дистиллированной воды —  $L_{\text{пр}} = 27 \text{ мм}$ .

Анализ результатов исследования позволяет утверждать, что основными параметрами мишени, определяющими характер ее взаимодействия с частицами, их форму и структуру, являются:

- толщина слоя материала, принимающего частицы; эта величина определяет длину камеры мишени и ее последующее конструктивное оформление;
- параметры факела распыления, определяющие размеры поперечного сечения мишени и рассчитываемые в соответствии с методикой, приведенной в работе [5];
- физико-механические и теплофизические характеристики материала среды мишени.

На основании изложенного методика определения параметров мишени включает в себя следующие этапы:

1) расчет начальной скорости капли расплава и ее размера исходя из известной теории центробежного диспергирования и параметров электродугового узла диспергирования;

2) вычисление по формуле (4) баллистического коэффициента капли расплава  $A_b$  (с учетом желательности сфероидальной формы частицы и  $\Phi = 1,21$ );

3) определение по выражению (3) поля скоростей капли в зависимости от ее начальной скорости и расстояния от точки отрыва до преграды;

4) выбор (предварительный) материала мишени с известной плотностью, вязкостью, прочностью, теплотой фазового перехода и теплопроводностью;

5) расчет по формуле (5) параметра соударяемой пары  $P$  для параметров частицы, определенных в п.1;

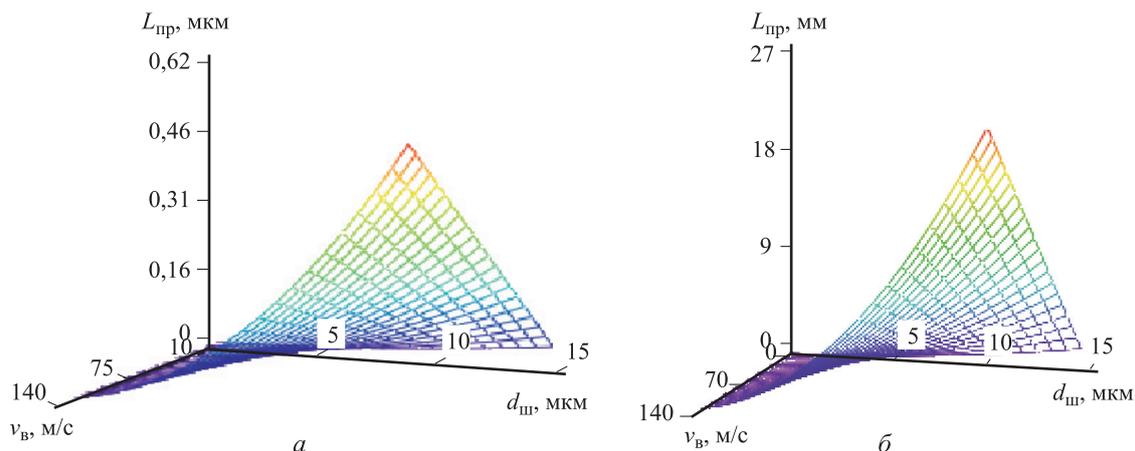


Рис. 4. Зависимости глубины предельного проникновения сферической частицы карбида вольфрама в преграду  $L_{пр}$  от ее диаметра  $d_{ш}$  и скорости встречи  $v_{в}$ : а — высокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ; б — дистиллированная вода

б) назначение с учетом найденного поля скоростей минимального расстояния, на котором по скорости встречи капля находится в области аэродинамического механизма внедрения;

7) определение по формуле (10) с учетом постоянных формулы (11) глубины предельного проникновения частицы в преграду;

8) оценивание найденных параметров на возможность реализации в габаритных и технологических параметрах установки; в случае несоответствия параметров мишени конструктивным требованиям расчет повторяют для других исходных условий материала мишени, скоростей и т. п.

## Выводы

1. Показано, что в качестве мишени при диспергировании тяжелых и твердых сплавов

(исходя из условия отсутствия деформации частицы твердосплавного материала) можно использовать широкую гамму твердых и жидких сред с характеристиками, обеспечивающими требуемую скорость кристаллизации частиц.

2. Предложена методика, которая позволяет определять конструктивные параметры мишени промышленных и экспериментальных установок, обеспечивающие сохранение требуемой формы частиц. Физико-механические характеристики материалов мишени также могут быть подобраны с использованием этой методики.

3. Установлено, что сегодняшний уровень развития машиностроительного производства технологически и конструктивно обеспечивает требуемые толщины слоев мишени.

## Литература

- [1] Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепции и современные проблемы. *Российский химический журнал*, 2002, т. 46, № 5, с. 50–56.
- [2] Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. Москва, Физматлит, 2005. 416 с.
- [3] Чухланцев О.А., Чухланцев Д.О., Ясевич В.И. *Плазменно-дуговой реактор с расходным катодом для получения порошков металлов, сплавов и их химических соединений*. Патент РФ 2708200. Заявл. 23.11.2018, опубл. 05.12.2019.
- [4] Мордынский В.Б., Гусев В.М., Тюфтяев А.С. и др. Диспергирование капли при электродуговой металлизации. *Физика и химия обработки материалов*, 2016, № 6, с. 74–81.
- [5] Зверовщиков А.Е., Дадушкин И.Е., Беспятов В.Н. Оценка кинематики технологического способа электродуговой сфероидизации металлических порошков. *Техника и технология современных производств*. Пенза, Приволжский Дом знаний, 2019, с. 78–82.
- [6] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004. 656 с.

- [7] Глазырин В.П., Орлов Ю.Н. Анализ динамики пробития преград компактными ударниками. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2015, № 11-3, с. 12–15, doi: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.42.003>
- [8] Кикоин И.К., ред. *Таблицы физических величин*. Москва, Атомиздат, 1976, 1009 с.
- [9] Горбатенко В.П., Новоселова Т.В. *Материаловедение*. Невинномысск, ЭльДирект, 2018. 323 с.
- [10] ТУ 6-05-18-96–80. *Сверхвысокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ*.
- [11] Ли Л., Шхинек К.Н. Воздействие льда на откосные сооружения. *Инженерно-строительный журнал*, 2014, № 1, с. 71–79, doi: <https://doi.org/10.5862/MCE.45.8>
- [12] Акапашев Р.А., Павлов В.В. Предел прочности и модуль сдвига воды при малых скоростях течения. *Известия Уральского государственного горного университета*, 2007, № 22, с. 15–18.
- [13] Якубовский Е.Г. *Определение вязкости твердого тела и жидкости*. URL: [http://www.russika.ru/userfiles/390\\_1440699044.pdf](http://www.russika.ru/userfiles/390_1440699044.pdf) (дата обращения: 10.01.2020).

## References

- [1] Andrievskiy R.A. Nanomaterials: conceptions and current issues. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2002, vol. 46, no. 5, pp. 50–56 (in Russ.).
- [2] Gusev A.I. *Nanometrialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 416 p.
- [3] Chukhlantsev O.A., Chukhlantsev D.O., Yasevich V.I. *Plazmenno-dugovoy reaktor s raskhoduемым katodom dlya polucheniya poroshkov metallov, spлавov i ikh khimicheskikh soedineniy* [Plasma-arc reactor with consumable cathode for production of powders of metals, alloys and their chemical compounds]. Patent RU 2708200. Appl. 23.11.2018, publ. 05.12.2019.
- [4] Mordynskiy V.B., Gusev V.M., Tyuftyaev A.S., et al. Dispersion of drops under arc spraying. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2016, no. 6, pp. 74–81 (in Russ.).
- [5] Zverovshchikov A.E., Dadushkin I.E., Bespyatov V.N. [Evaluation of the kinematics of the technological method of the arc spheroidization of metal powders]. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennykh proizvodstv* [Technics and Technology of Modern Industries]. Penza, Privolzhskiy Dom znaniy Publ., 2019, pp. 78–82 (in Russ.).
- [6] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva. T. 2* [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 656 p.
- [7] Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Analysis of dynamics penetrating of targets by compact strikers. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2015, no. 11-3, pp. 12–15, doi: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.42.003> (in Russ.).
- [8] Kikoin I.K., ed. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1009 p.
- [9] Gorbatenko V.P., Novoselova T.V. *Materialovedenie* [Material engineering]. Nevinnomysk, El'Direkt Publ., 2018. 323 p.
- [10] ТУ 6-05-18-96-80. *Sverkhvysokomolekulyarnyy polietilen SVMPE* [Technical conditions TU 6-05-18-96–80. Ultrahigh-molecule polyethylene].
- [11] Li Lyan, Shkhinek K.N. Dynamic interaction between ice and inclined structure. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2014, no. 1, pp. 71–79, doi: <https://doi.org/10.5862/MCE.45.8> (in Russ.).
- [12] Akapashev R.A., Pavlov V.V. Strength limit and water shift module in low current velocities. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2007, no. 22, pp. 15–18 (in Russ.).
- [13] Yakubovskiy E.G. *Opreделение vyazkosti tverdogo tela i zhidkosti* [Definition of solids and liquids viscosity]. URL: [http://www.russika.ru/userfiles/390\\_1440699044.pdf](http://www.russika.ru/userfiles/390_1440699044.pdf) (accessed: 10.01.2020).

## Информация об авторах

**КОЛМАКОВ Константин Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Химия». ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет (440026, Пенза, Российская Федерация, ул. Красная, д. 40, e-mail: Chemistry.GU@yandex.ru).

**ЗВЕРОВЩИКОВ Александр Евгеньевич** — доктор технических наук, зав. кафедрой «Технология машиностроения». ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет (440026, Пенза, Российская Федерация, ул. Красная, д. 40, e-mail: azwer@mail.ru).

**СХИРТЛАДЗЕ Александр Георгиевич** — доктор педагогических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления». МГТУ Станкин (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский пер., д. 1, e-mail: a.skhirtladze@stankin.ru).

**СОКОЛОВ Алексей Владимирович** — кандидат технических наук, начальник сектора наукометрии. ФГБОУ ВПО Пензенский государственный университет (440026, Пенза, Российская Федерация, ул. Красная, д. 40, e-mail: a.sokolov-86@mail.ru).

## Information about the authors

**KOLMAKOV Konstantin Mikhailovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Chemistry. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Penza State University (440026, Penza, Russian Federation, Krasnaya St., Bldg. 40, e-mail: Chemistry.GU@yandex.ru).

**ZVEROVSHCHIKOV Aleksandr Evgenyevich** — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department of Technology of Mechanical Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Penza State University (440026, Penza, Russian Federation, Krasnaya St., Bldg. 40, e-mail: azwer@mail.ru).

**SKHIRTADZE Aleksandr Georgievich** — Doctor of Science (Pedagogy), Professor, Department of Automated Information Processing and Control Systems. Moscow State Technical University Stankin (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovsky lane, Bldg. 1, e-mail: a.skhirtladze@stankin.ru).

**SOKOLOV Aleksey Vladimirovich** — Candidate of Science (Eng.), Head of the Sector of Scientometrics. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Penza State University (440026, Penza, Russian Federation, Krasnaya St., Bldg. 40, e-mail: a.sokolov-86@mail.ru).

### Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колмаков К.М., Зверовщиков А.Е., Схиртладзе А.Г., Соколов А.В. Определение параметров гетерогенной среды мишени при центробежно-дуговом диспергировании твердых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 8, с. 50–57, doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-50-57

### Please cite this article in English as:

Kolmakov K.M., Zverovshchikov A.E., Skhirtladze A.G., Sokolov A.V. Determination of the Parameters of the Target Heterogeneous Medium During Centrifugal Arc Dispersion of Hard Alloys. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 8, pp. 50–57, doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-50-57