

УДК 621.762

*А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ**

*A.I. Rudskoi, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopaev*

## **DEFINING THERMAL-PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS TO MODEL THE PROCESS OF GRANULATED METAL PRODUCTION**

В статье получены аналитические зависимости теплофизических свойств газовой среды (гелий и аргон), необходимые при моделировании процесса получения гранул методом вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP). Численное моделирование процесса дает возможность до проведения опыта прогнозировать структуру материала и предсказывать новые механизмы взаимосвязи параметров технологических процессов получения гранул. Результаты исследований показали взаимосвязь аэродинамической и тепловой моделей, поскольку при аэродинамических расчетах необходимо учитывать зависимость числа Рейнольдса от температуры. Найденные зависимости имеют большое прикладное значение, так как позволяют значительно повысить точность расчетов при моделировании аэродинамических и тепловых процессов распыления электродов.

ГРАНУЛЫ; ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ; АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГАЗОВАЯ СРЕДА; АРГОН; ГЕЛИЙ.

The present article defines analytical dependencies of thermal-physical properties of gas environment (helium and argon), which are necessary to model the process of granules production by the rotating electrode with plasma heating (PREP) method. Numerical modelling of the process allows predicting parameters of the material structure before the experiment and also forecasting new mechanisms of interrelations between process modes and granule crystallization. The research results showed the interrelation of aerodynamic and thermal models, as at aerodynamic calculations it is necessary to consider the dependence of the Reynolds number on temperature. The revealed dependencies are of great applied value, as they ensure the considerable increase in the calculation accuracy when modeling aerodynamic and thermal processes of electrodes dispersion.

GRANULES; THERMAL-PHYSICAL PROPERTIES; ANALYTICAL DEPENDENCIES; MODELLING; GAS ENVIRONMENT; ARGON; HELIUM.

Существенную роль в решении вопросов улучшения качества деталей, повышения производительности труда, использования ресурсосберегающих технологий в машиностроении, автомобилестроении, тракторостроении и других важных отраслях промышленности отводят новым материалам, обладающим комплексом повышенных механических характеристик. Порошковые материалы и изделия из них занимают весомую долю в производстве деталей с улучшенными эксплуатационными и специальными свой-

ствами. Актуальны работы по созданию новых технологий производства таких материалов [1–4], в том числе технологий получения поверхностных слоев с заданной структурой и свойствами [5–7]. Одно из наиболее перспективных направлений исследований в этой области — разработка технологии синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ), основанная на операции послойного плавления порошка тугоплавких сплавов.

Для получения гранульных композитов [8], послойного синтеза изделий с помощью элект-

тронного луча [9] и реализации других технологиче- ских задач актуальна задача промышленной реализации и совершенствования методов получения гранул тугоплавких металлов и сплавов. Наиболее перспективный из них в прокладном отношении — метод вращающейся заготовки.

В промышленном производстве используются следующие способы, обеспечивающие получение материала в форме гранул: центробежное распыление расходуемого электрода (заготовки); центробежное распыление с вращающимся тиглем; газоструйное распыление; распыление растворенным водородом; центробежное распыление с электронно-лучевым нагревом. Среди различных методов получения порошков в России наиболее широкое распространение получил метод вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP).

Таким образом, разработка технологических режимов получения гранул тугоплавких металлов и сплавов методом PREP представляет собой актуальную задачу; для ее реализации целесообразно использовать методы математического моделирования. Для проведения математического моделирования процесса получения гранул методом PREP необходимо знать зависимость теплофизических свойств гелия и аргона при температурах близких к температурам расплава материала электрода.

Цель нашей работы — предложить аналитические зависимости теплофизических свойств газовой среды (гелий и аргон), необходимые для моделирования процесса получения гранул ме-

тодом вращающегося электрода с плазменным нагревом.

### Особенности технологического процесса и методика расчетов

Процесс получения гранул жаропрочных и титановых сплавов методом PREP показан на рис. 1. Вращающийся электрод подается в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце электрода образуется жидкая пленка металла толщиной в несколько раз меньше диаметра образующихся гранул. Отделение частицы от электрода происходит с торцевого жидкого венца, диаметр которого больше диаметра электрода [10].

Частицы расплава, оторвавшись от венца вращающейся заготовки, перемещаясь в газовой среде, образуют после кристаллизации сферические гранулы, которые из плавильной камеры попадают в приемный бункер (рис. 1).

Условия кристаллизации частиц расплава, протекающей со скоростью охлаждения от  $10^4$ °C/с до  $10^6$ °C/с, обеспечивают очень высокий уровень структурных и механических свойств гранул.

Для более интенсивного отвода тепла от частицы, помимо охлаждения излучением, целесообразно использовать конвективное охлаждение в потоке смеси инертных газов (аргон и гелий). В процессе охлаждения частицы теплоотдача путем принудительной конвекции примерно на порядок превосходит потери тепла за счет излучения. В этом случае длина полета

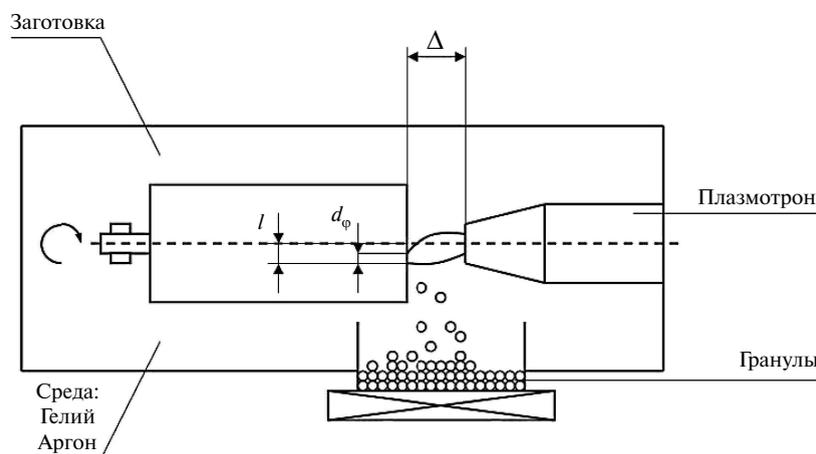


Рис. 1. Получение гранул жаропрочных и титановых сплавов методом вращающейся заготовки

частицы, регулируемая скоростью подачи и составом газовой смеси в камере распыления, существенно уменьшается.

Процентный состав смеси определяется технологией и свойствами инертных газов:

гелий, обладая на порядок большей теплопроводностью, чем аргон, обеспечивает большие скорости охлаждения частиц;

аргон имеет большую плотность, чем гелий, что увеличивает время полета частицы в камере, отчасти компенсируя меньшую теплопроводность аргона.

Важнейшими параметрами, влияющими на скорость охлаждения частицы, являются размер частицы, разность температур между частицей и газом, теплофизические свойства газа и материала частицы.

Скорость охлаждения частицы можно оценить по следующей формуле [11]:

$$dT/dt = (6\lambda_g Nu/d^2 C_p \rho) (T_p - T_g), \quad (1)$$

где  $\lambda_g$  — теплопроводность газа;  $Nu$  — число Нуссельта;  $d$  — диаметр частицы;  $C_p$  — теплоемкость частицы с учетом скрытой теплоты плавления;  $\rho$  — плотность частицы;  $T_p$ ,  $T_g$  — температуры газа и частицы соответственно.

Влияние скорости охлаждения частиц расплавленного металла на характеристики микроструктуры исследованы во многих работах [11, 12]. Скорость охлаждения частицы зависит от состава охлаждающей среды, скорости движения частицы. Распыление при скорости охлаждения капель до  $10^4$  К/с, как правило, приводит к формированию микрокристаллических и тонких дендритных структур. При переохлаждении частицы можно получить гранулы недендритной структуры [12].

Основными параметрами управления процессом охлаждения частиц являются геометрические размеры камеры распыления и состав газовой среды [13, 14].

Метод PREP достаточно хорошо исследован при распылении жаропрочных никелевых и отчасти титановых сплавов. Известны математические модели (ММ) процесса распыления, описывающие процесс получения гранул из жаропрочных никелевых сплавов [10, 14, 15].

В то же время разработка технологических режимов получения гранул тугоплавких металлов и сплавов методом PREP представляет собой актуальную задачу, для реализации которой с целью

сокращения расходов на исследование и времени на проведение экспериментов целесообразно использовать методы математического моделирования. Численное моделирование процесса дает возможность до проведения опыта прогнозировать параметры внутренней структуры материала, предсказывать новые механизмы взаимосвязей режимов процессов и кристаллизации гранул.

Для математического моделирования процесса получения гранул методом PREP необходимо знать зависимость теплофизических свойств гелия и аргона при температурах, близких к температурам расплава материала электрода. Функциональные зависимости коэффициента динамической вязкости и плотности от температуры необходимы при моделировании аэродинамики полета частицы в среде инертных газов, а коэффициентов теплопроводности и теплоемкости — при исследовании тепловых процессов.

В работах [16, 17] приведены значения теплофизических параметров гелия (табл. 1) и аргона (табл. 2) при заданных температурах до  $1000$  °С (табл. 1).

Для получения функциональных зависимостей коэффициента динамической вязкости  $\mu$  и теплопроводности  $\lambda$  воспользуемся формулами Сатерленда [17]:

$$\mu = C_1 T_i^{1,5} / (T_i + C_2); \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{C_3 T_i^{1,5}}{T_i + C_4}, \quad (3)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  — постоянные коэффициенты;  $T_i$  — абсолютная текущая температура, К.

Для нахождения коэффициентов используем метод наименьших квадратов (МНК).

Пусть

$$y = \frac{C_1 x^{1,5}}{x + C_2}. \quad (4)$$

Здесь  $C_2$  входит нелинейно, но поскольку  $x_i$  и  $y_i$  равноценны в эксперименте, то правомерно следующее преобразование:

$$y \approx xy \approx xy + yC_2, \quad (5)$$

то есть

$$yx + C_2 y = C_1 x^{1,5} \Rightarrow C_1 x^{1,5} - C_2 y = xy. \quad (6)$$

Составляем целевую функцию:

$$F(C_1, C_2) = \sum_i (y_i x_i - C_1 x_i^{1,5} + C_2 y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

Таблица 1

Зависимость теплофизических параметров гелия от температуры при давлении  $p = 1 \text{ кг/см}^2$

Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·град)	Теплопроводность Вт/(м·град)	Динамическая вязкость 10 <sup>-5</sup> ·Па·с
0	0,1727	5191,632	0,143	1,86
100	0,1265	5191,632	0,179	2,28
500	0,0610	5191,632	0,305	3,75
1000	0,0371	5191,632	0,442	5,24

Таблица 2

Зависимость теплофизических параметров аргона от температуры при давлении  $p = 1 \text{ кг/см}^2$

Температура, °К	Плотность, кг/м	Теплоемкость, Дж/(кг·град)	Динамическая вязкость, 10 <sup>-5</sup> ·Па·с	Теплопроводность 10 <sup>-2</sup> ·Вт/(м·град)
300	1,6236	521,257	2,274	1,78
400	1,2170	521,257	2,85·10	2,23
800	0,6083	520,838	4,62·10	3,76
1200	0,4056	520,838	5,95·10	4,85

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial C_1} = 2 \sum_i (y_i x_i - C_1 x_i^{1,5} + C_2 y_i) (-x_i^{1,5}) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial C_2} = 2 \sum_i (y_i x_i - C_1 x_i^{1,5} - C_2 y_i) (y_i) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

или

$$\begin{cases} \sum_i (y_i x_i^{2,5} - C_1 x_i^3 + C_2 y_i x_i^{1,5}) = 0; \\ \sum_i (y_i^2 x_i - C_1 x_i^{1,5} y_i - C_2 y_i^2) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Окончательно получаем

$$\begin{cases} \left( \sum_i x_i^3 \right) C_1 - \left( \sum_i x_i^{1,5} y_i \right) C_2 = \left( \sum_i y_i x_i^{2,5} \right); \\ \left( \sum_i x_i^{1,5} y_i \right) C_1 - \left( \sum_i y_i^2 \right) C_2 = \left( \sum_i x_i y_i^2 \right). \end{cases} \quad (10)$$

Для гелия и аргона имеем четыре значения  $x_i$  и  $y_i$  (см. табл. 1 и 2). Решая систему из двух уравнений, получаем значения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ .

Так, для расчета динамической вязкости гелия имеем значения коэффициентов, равные  $C_1 = 1,634 \cdot 10^{-6}$ ,  $C_2 = 147,9773$ ; для аргона —  $C_1 = 1,914 \cdot 10^{-6}$ ,  $C_2 = 137,477$ .

Аналогично с использованием МНК были определены коэффициенты  $C_3$  и  $C_4$  для расчета коэффициента теплопроводности. Для гелия

значения коэффициентов равны  $C_3 = 0,014477$ ,  $C_4 = 221,6391$ ; для аргона —  $C_3 = 0,001594$ ,  $C_4 = 164,718$ .

Функциональная зависимость плотности от температуры имеет следующий вид:

$$\rho_r = P C_5^{-1} T^1, \quad (11)$$

где  $P$  — абсолютное давление;  $C_5$  — постоянный коэффициент;  $T$  — абсолютная температура.

Для гелия коэффициент  $C_5 = 2153,7$ , для аргона —  $C_5 = 207,5$ .

### Результаты

#### экспериментально-расчетного анализа

Нелинейная зависимость теплофизических параметров гелия от температуры, рассчитанная по формулам (2), (3), (11) и табличным данным, приведена на рис. 2–4 (сплошная линия — табличные данные, пунктирная линия — расчетные данные).

Следует отметить хорошее совпадение зависимостей  $\mu(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$ , полученных по аналитическим формулам и по табличным данным. Аналогичные зависимости получены для аргона.

Было проведено исследование по определению влияния температуры на число Рейнольдса при полете частицы в среде аргона, гелия и кислорода. Рассмотрим практический случай получения частицы диаметром 100 мкм из титанового

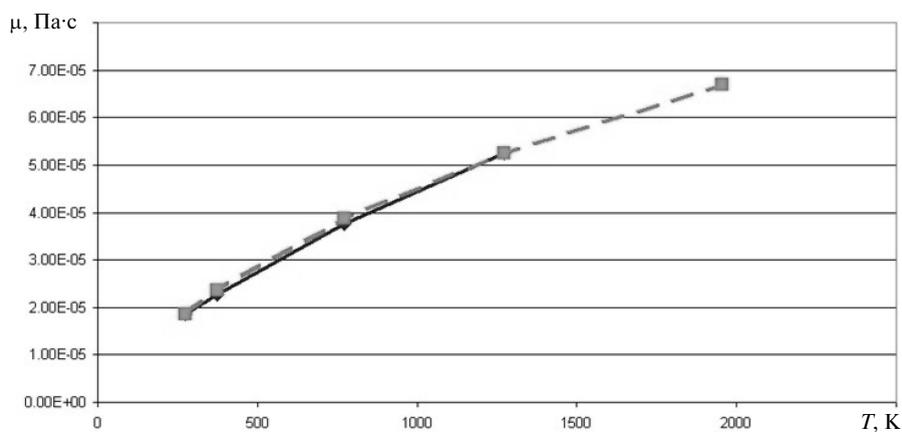


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамической вязкости гелия от температуры  
(—●— —  $h$ ; - -■- -  $h_{anal}$ )

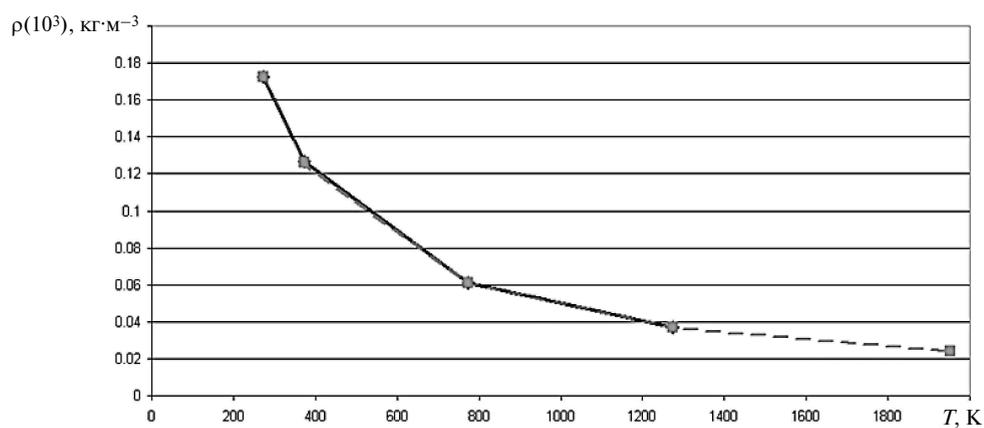


Рис. 3. Зависимость плотности гелия от температуры  
(—●— —  $r_0$ ; - -■- -  $r_{0\_form}$ )

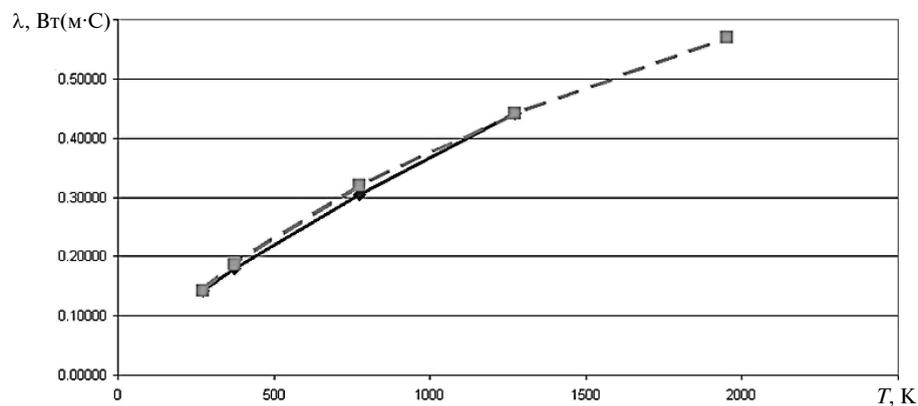


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности гелия от температуры  
(—●— —  $l$ ; - -■- -  $l_{anal}$ )

сплава, тогда начальная скорость отрыва частицы от венца равна

$$V_0 = \frac{2\pi D_3}{2} \frac{n}{60} = 92,15338 \text{ м/с},$$

где  $n$  — частота вращения электрода ( $n = 22000$  об/мин);  $D_3$  — диаметр заготовки ( $D_3 = 0,08$  м).

Число Рейнольдса рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{Re} = \frac{\rho_r(T)V_q l}{\mu(T)}, \quad (12)$$

где  $V$  — скорость движения частицы;  $l$  — характерный линейный размер (принимается равным диаметру частицы  $d_q$ ).

Зная функциональные зависимости плотности и динамической вязкости газовой среды от температуры, можно определить аналогичную зависимость и для числа Рейнольдса. На рис. 5 показаны графические зависимости числа Рейнольдса от температуры при движении частицы в аргоне, гелии и кислороде.

В работе [18] О.Н. Нейков и И.Н. Логачев дали достаточно подробный анализ аэродинамических характеристик порошков и пылевидных частиц. В частности, были систематизированы расчетные формулы для определения коэффициента аэродинамического сопротивления частиц сферической формы в зависимости от числа Рейнольдса.

Полет частиц в газовой среде происходит не в ламинарном или турбулентном режимах, а в переходной области, которая характеризуется диапазоном изменения числа Рейнольдса от 1 до 1000 (рис. 6).

В переходной области для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  можно воспользоваться формулами Серафини, Шиллера и Наумана, Лангмюра и Блоджетта, Румфа и других [18].

Для расчета  $C_x$  в модели используется известная интерполяционная формула Л.С. Клячко [18]

$$C_x = 24 (1 + \text{Re}^{2/3}/6)/\text{Re}. \quad (13)$$

Несомненное достоинство формулы Клячко — высокая точность вычисления коэффициента аэродинамического сопротивления: при  $\text{Re} < 400$  отклонение от экспериментального значения не превышает 2–3 %. Недостаток формулы Клячко — нелинейность — при числовом методе решения дифференциальных уравнений нивелируется.

При расчетах можно также воспользоваться формулой Шиллера и Наумана, которая очень близка к формуле Клячко:

$$C_x = 24 (1 + 0,15 \text{Re}^{0,687})/\text{Re}. \quad (14)$$

Помимо теплофизических параметров газовой среды для моделирования процесса получения гранул необходимо знать зависимость теплофизических параметров материала электрода от температуры (для нашего случая — титан).

Нелинейная зависимость теплопроводности титана от температуры в нескольких точках до  $1300^\circ$  приведена в [19]. Для получения значений коэффициента теплопроводности при температурах до  $2000^\circ\text{C}$ , необходимой при моделировании технологических процессов, учитывающих фазовый переход, воспользуемся полиномом 4-й степени:

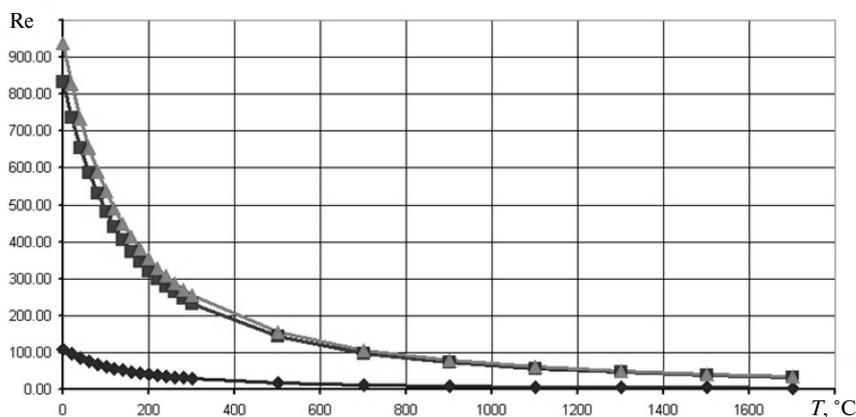


Рис. 5. Зависимость числа Рейнольдса от температуры при полете гранулы в газовой среде гелия, кислорода и аргона (—◆— — ReHe 1,2 atm; —■— — ReO2 1,2 atm; —▲— — ReAr 1,2 atm)

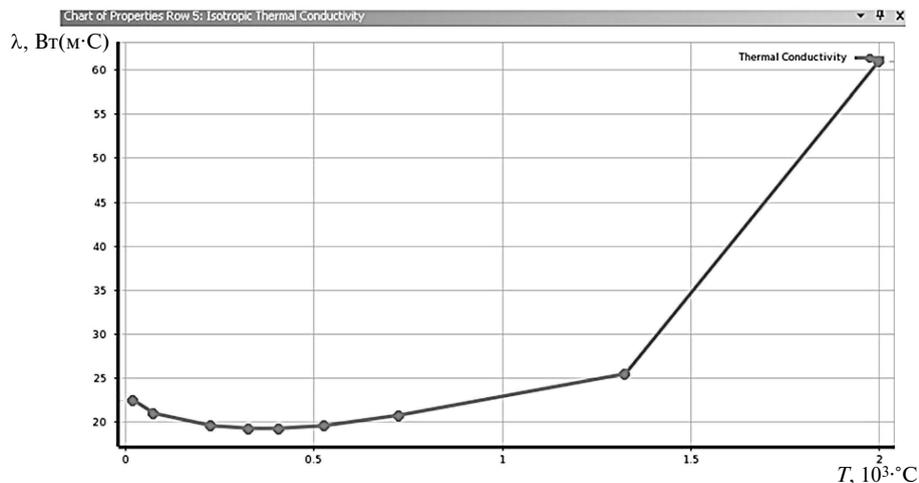


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности титана от температуры

$$\lambda(T) = A_0 + A_1 T^1 + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4, \text{ Вт/(м·К)}. \quad (15)$$

Для нахождения коэффициентов  $A_i$  используем МНК. В результате решения системы уравнений с 5-ю неизвестными имеем

$$\lambda(T) = 22,359 - 0,0207 T^1 + 4 \cdot 10^{-5} T^2 - 3 \cdot 10^{-8} T^3 + 9 \cdot 10^{-12} T^4, \text{ Вт/(м·град)}, \quad (16)$$

Графическая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры приведена на рис. 6. Видно, что для температур до 1100 °С характерен участок с малыми значениями коэффициента теплопроводности, что соответствует большей скорости нагрева. При более высоких

температурах наступает резкое нелинейное увеличение коэффициента теплопроводности.

Функциональная зависимость плотности от температуры имеет следующий вид (рис. 7):

$$\rho(T) = 4561,506 - 0,12442 T, \text{ кг/м}^3. \quad (17)$$

Температура в формулах (15)–(17) измеряется в °С. Значительные изменения теплопроводности  $\lambda(T)$ , плотности  $\rho(T)$ , теплоемкости  $C(T)$  показывают, что система дифференциальных уравнений тепло-массопереноса, описывающая процесс получения гранул, существенно нелинейная.

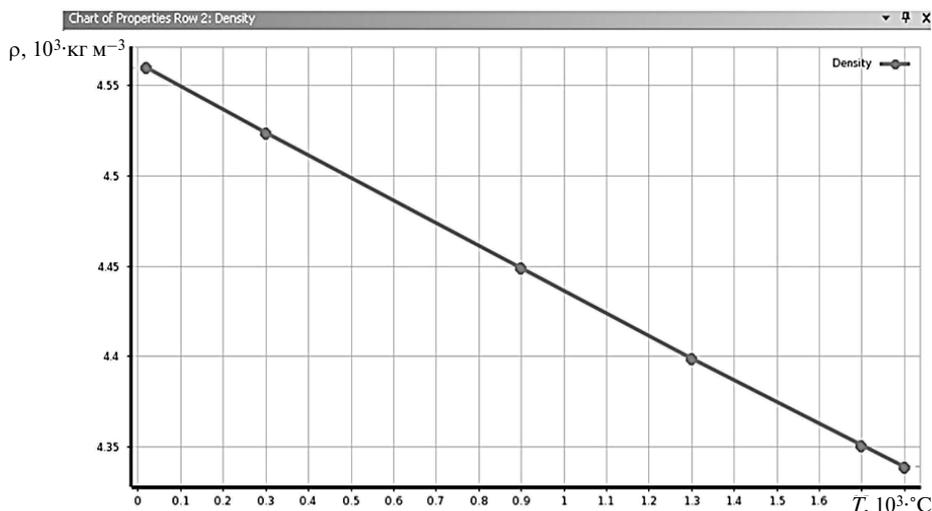


Рис. 7. Зависимость плотности титана от температуры

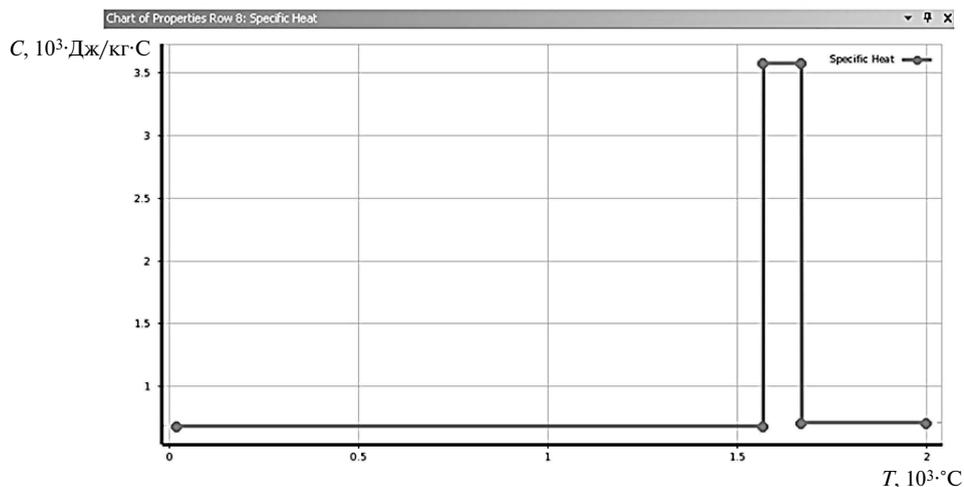


Рис. 8. Зависимость теплоемкости титана от температуры

Теплоемкость материала частицы с учетом фазового перехода представлена на рис. 8.

На основе расчетно-экспериментального анализа определены аналитические зависимости теплофизических свойств газовой среды (гелий и аргон) и материала частицы (титан) при температурах, близких к температурам расплава материала; они необходимы для проведения математического моделирования процесса получения гранул методом PREP.

Выполненные исследования показали взаимосвязь аэродинамической и тепловой моделей

в связи с тем, что при аэродинамических расчетах необходимо учитывать зависимость числа Рейнольдса от температуры.

Полученные теплофизические зависимости имеют большое прикладное значение, так как позволяют значительно повысить точность расчетов при моделировании аэродинамических и тепловых процессов распыления электродов, а также прогнозировать значения теплофизических параметров газовой среды и тугоплавких материалов в диапазонах температур, не рассматривавшихся в справочной литературе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148–155.
2. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
4. Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Булыжев Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
5. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. August 2012. Vol. 26. N. 8. P. 629–632.
6. Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
7. Кондратьев С.Ю., Попов В.О. Получение износостойкого квазинаноструктурного поверхностного слоя в сталях и цветных сплавах лазерной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 22–28.
8. Москвичев Ю.П., Панин В.И., Агеев С.В., Чайнов Н.Д., Мягков Л.Л. Гранульные композиты и эффективность их применения // Actual Conference. 2011. № 1. С. 46–50.
9. Biamino S., Penna A.U., Ackelid U., Sabbadini S.,

**Tassa O., Fino P., Pavese M.P. Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Tie48Ale2Cre2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.

10. **Сухов Д.И.** Применение математической модели для анализа влияния параметров плазменного распыления на крупность гранул титанового сплава VT25УП // *Технология легких сплавов*. 2013. № 2. С. 57–68.

11. **Гессингер Г.Х.** Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. Челябинск: Металлургия, 1988. 320 с.

12. **Эскин Г.И.** Условия формирования недендритной структуры в слитках и гранулах легких и жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2013. № 4. С. 147–159.

13. **Мусяенко В.Т.** Особенности распыления вращающейся заготовки // В кн. *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1986. Вып. 3. С. 23–33.

14. **Орлов В.К.** К инженерному расчету аэродинамики частицы при центробежном распылении расплава // В кн. *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1984. Вып. 2. С. 33–40.

15. **Мусяенко В.Т.** Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки // В кн. *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 41–48.

16. **Ачеркан Н.С.** Справочник металлиста. Т. 1. М.: Машиностроение, 1965. 1007 с.

17. **Юдаев Б.Н.** Теплопередача. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1973. 360 с.

18. **Нейков О.Д., Логачев И.Н.** Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков. М.: Металлургия, 1981. 192 с.

19. **Арутюнов Р.В., Баранов В.И., Большов Л.А. [и др.]** Воздействие лазерного излучения на материалы. М.: Наука, 1989. 367 с.

## REFERENCES

1. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Iu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)

2. **Rudskoi A.I., Kokorin V.N., Kondratiev S.Iu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

3. **Rudskoi A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskikh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

4. **Kokorin V.N., Rudskoy A.I., Filimonov V.I., Bulzhev Ie.M., Kondratiev S.Iu.** Teoriya i praktika protsessa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)

5. **Kondratiev S.Iu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26. N. 8. P. 629–632.

6. **Kondratiev S.Iu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

7. **Kondratiev S.Iu., Popov V.O.** Polucheniye iznosostoykogo kvazinanostrukturnogo poverkhnostnogo sloya v stalyakh i tsvetnykh splavakh lazernoy obrabotkoy. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. 2011. № 2. S. 22–28. (rus.)

8. **Moskvichev Iu.P., Panin V.I., Ageiev S.V., Chainov N.D., Miagkov L.L.** Granulnyye kompozity i effektivnost ikh primeneniya. *Actual Conference*. 2011. № 1. S. 46–50. (rus.)

9. **Biamino S., Penna A.U., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M.P. Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Tie48Ale2Cre2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.

10. **Sukhov D.I.** Primneniye matematicheskoy modeli dlya analiza vliyaniya parametrov plazmennogo raspyleniya na krupnost granul titanovogo splava VT25UP. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2013. № 2. S. 57–68. (rus.)

11. **Gessinger G.Kh.** Poroshkovaya metallurgiya zharoprochnykh splavov. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988. 320 s. (rus.)

12. **Eskin G.I.** Usloviya formirovaniya nedendritnoy struktury v slitkakh i granulakh legkikh i zharoprochnykh nikelovykh splavov. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2013. № 4. S. 147–159. (rus.)

13. **Musiienko V.T.** Osobennosti raspyleniya vrashchayushcheyasya zagotovki. *V kn.: Metallurgiya granul*. М.: VILS, 1986. Vyp. 3. S. 23–33. (rus.)

14. **Orlov V.K.** K inzhenernomu raschetu aerodinamiki chastitsy pri tsentrobezhnom raspylenii raspлава. *V kn.: Metallurgiya granul*. М.: VILS, 1984. Vyp. 2. S. 33–40. (rus.)

15. **Musiienko V.T.** Zakonomernosti obrazovaniya granul pri tsentrobezhnom raspylenii vrashchayushcheyasya zagotovki. *V kn.: Metallurgiya granul*. М.: VILS, 1983. Vyp. 1. S. 41–48. (rus.)

16. **Acherkan N.S.** Spravochnik metallista. Т. 1. - М.: Mashinostroyeniye, 1965. 1007 s. (rus.)

17. **Iudaiev B.N.** Теплопередача: Учебник для вузов. М.: Vysshaya shkola, 1973. 360 s. (rus.)



18. **Neykov O.D., Logachev I.N.** Aspiratsiya i obespylivaniye vozdukhа pri proizvodstve poroshkov. M.: Metallurgiya, 1981. 192 s. (rus.)

19. **Arutyunov R.V., Baranov V.I., Bolshov L.A. [i dr.]**. Vozdeystviye lazernogo izlucheniya na materialy. M.: Nauka, 1989. 367 s. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**РУДСКОЙ Андрей Иванович** — доктор технических наук ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: rector@spbstu.ru

**СОКОЛОВ Юрий Алексеевич** — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

**КОПАЕВ Владимир Николаевич** — ведущий инженер, ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: vkopaev\_ela@mail.ru

#### AUTHORS

**RUDSKOI Andrei I.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

**SOKOLOV Iurii. A.** — “Electromechanica”. 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru

**KOPAЕV Vladimir N.** — “Electromechanica”. 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: vkopaev\_ela@mail.ru