

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 202?. Т. ?, № ?. С. ?—?.
DOI: ?

УДК 536.21; 536.4

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ, ОЛОВА И ЦИНКА В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

© 2025 г. С. В. Терехов¹✉

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина,

ул. Розы Люксембург, 72, Донецк, 283048, Россия

✉Автор для переписки: svlter@yandex.ru

Аннотация. Алюминий и его сплавы являются одними из самых применяемых материалов при производстве технических изделий: от электрических проводов до летательных аппаратов. Разработка новых сплавов алюминия и постоянное расширение области их применения приводит к необходимости разработки единого подхода к теоретическому описанию физических свойств систем с разным числом компонентов и определению влияния металлов на характеристики сплава. Для исследования особенностей теплового поведения алюминиевых сплавов наиболее подходящими являются бинарные системы в силу малой вариативности их составов. Такими сплавами являются, в частности, антифрикционные самосмазывающиеся двухкомпонентные сплавы систем Al-Sn и Al-Zn. Кроме того, в силу существования эффекта наследования сплавом ряда характерных черт компонентов возникает потребность в расчете теплофизических свойств Al, Sn и Zn. В этой связи была проведена аппроксимация массивов экспериментальных данных по температурным зависимостям теплофизических свойств Al, Sn и Zn с использованием функций, полученных в рамках авторской квазидвухфазной модели локально-равновесной области. Особенности на полученных графиках в виде конечных скачков, пиков и ям с округлыми вершинами связаны со структурными превращениями или фазовыми переходами. Выдвинуто предположение о наличии в диапазоне температур 100-200 К ям на температурных зависимостях теплопроводностей алюминия и цинка, образующихся из-за протекания структурных превращений в указанных металлах, или из-за возникновения в них структурных неоднородностей при кристаллизации. Проведены прогностические оценки теплоемкостей сплавов $Al_{60}Sn_{40}$ и $Al_{95}Zn_5$, полученные с применением правила смешения (в химии – правила получения соединения заданного состава).

Ключевые слова: металл, теплоемкость, плотность, теплопроводность, температуропроводность, электросопротивление, аппроксимация.

Для цитирования: Терехов С.В. Теплофизические свойства алюминия, олова и цинка в конденсированном состоянии. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2025; ?(?): ?—?. <https://doi.org/?>

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ALUMINUM, TIN AND ZINC IN THE CONDENSED STATE

S. V. Terekhov¹✉

¹*Donetsk Institute of Physics and Technology named after A.A. Galkin,*

ul. Rosa Luxemburg, 72, Donetsk, 283048, Russia

✉*Author for correspondence: svlter@yandex.ru*

Abstract. Aluminum and its alloys are one of the most used materials in the production of technical products: from electrical wires to aircraft. The development of new aluminum alloys and the constant expansion of the field of their application leads to the need to develop a unified approach to the theoretical description of the physical properties of systems with a different number of components and to determine the influence of metals on the characteristics of the alloy. For the study of thermal behavior of aluminum alloys, binary systems are the most suitable due to the small variability of their compositions. Such alloys are, in particular, antifriction self-lubricating two-component alloys of Al-Sn and Al-Zn systems. In addition, due to the existence of the effect of inheritance by the alloy of a number of characteristic features of components, there is a need to calculate the thermophysical properties of Al, Sn and Zn. In this connection, we approximated the experimental data arrays on the temperature dependences of thermal-physical properties of Al, Sn and Zn using the functions obtained within the framework of the author's quasi-two-phase model of the local-equilibrium region. The features on the obtained graphs in the form of finite jumps, peaks and pits with rounded tops are associated with structural transformations or phase transitions. It is suggested that in the temperature range of 100-200 K there are pits in the temperature dependences of thermal conductivities of aluminum and zinc formed due to structural transformations in these metals or due to the occurrence of structural inhomogeneity in them during crystallization. Predictive estimates of heat capacities of Al₆₀Sn₄₀ and Al₉₅Zn₅ alloys obtained using the mixing rule (in chemistry – the rule of obtaining a compound of a given composition) have been carried out.

Keywords: metal, heat capacity, density, thermal conductivity, thermal conductivity, thermal conductivity, electrical resistance, approximation.

For citation: Terekhov S.V. Thermophysical properties of aluminum, tin and zinc in the condensed state. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2025; ?(?): ?-?. <https://doi.org/?>

Введение

Алюминий применяют при решении большого числа практических задач. Так его сплавы (AlTi_{0.1}; AMg₂; САВ-1 и др.) применяют для изготовления: проволоки,

фасонных отливок, коммутационных переключателей, корпусов электромоторов, дверей и окон, оболочек тепловыделяющих элементов, деталей автомобилей, самолетов и ракет [1-13]. Добавки в чистый алюминий при сохранении неравновесного состояния в готовом изделии изменяют

тепловые, механические, электрические и другие свойства материала [1-13]. Легирование алюминия и его сплавов производят различными элементами (Sn, Zn, Li, Sr, In и др. [2-8,10-13]). В частности, наибольший рост твердости сплава достигается при введении в алюминий таких малорастворимых элементов, как Mg, Ca, Mn, Cr, Ti, Zr и Fe [4] с сильно отличающимися атомными размерами по сравнению с атомом алюминия.

Другими важными свойствами алюминиевых сплавов являются теплоемкость C (Дж/(моль·К)), коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР) α_L (К⁻¹), плотность d (кг/м³), теплопроводность λ (Вт/(м·К)); температуропроводность a (м²/с) и удельное электросопротивление ρ (Ом·м). Знание теплофизических характеристик позволяет проводить изучение других свойств сплавов. Например, по теплоемкостям сплава Al-Sn и его компонентов можно вычислить температуру и тип фазового превращения, температуру Дебая, коэффициент электронной теплоемкости и т. д. [13]; исследовать проблемы термодинамической и временной устойчивости, в частности, изделий из неравновесного сплава Al-Zn [12]; установить взаимосвязи термодинамических функций со структурой и строением сплава.

Так экспериментаторы аппроксимируют кривые теплоемкости полиномами, а затем по ним восстанавливают температурные зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса (см., например, работу [7] для сплава АК1: алюминий – 93 %, медь – от 2 до 5 %, легирующие элементы – от 2 до 4 %). С практической точки зрения исследования теплоемкости алюминия и компонентов его сплавов представляют интерес при расчете энергетических балансов процессов в реакторах химического производства, для выбора оптимальных теплоносителей (в том числе, жидкометаллических) и для создания новых композиционных материалов на основе алюминия с лучшими и

принципиально новыми теплофизическими свойствами.

По температурной зависимости теплопроводности вычисляют вклад решеточной подсистемы, в частности, конструкционного сплава САВ-1 (0.6-1.2 % – кремний, 0.45-0.9 % – магний, остальное – алюминий) [10] с использованием формулы Дебая [14]

$$\lambda = Cvl/3, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность, C – теплоемкость, l и v – длина свободного пробега и скорость электрона; выявляют эффекты после радиационного облучения [10].

При производстве изделий, не подвергающихся значительным нагрузкам, обычно используют сплав АМг2, содержащий до 98.2 % Al + 2.4 % Mg + примеси (железо, кремний, марганец, медь, титан и другие химические элементы с содержанием не более 1-2 %). Из него изготавливают холодильное оборудование, профили окон и дверей, штамповки и поковки, ленты, профили, панели, проволоки. Сплав АМг2 обладает достаточной прочностью, превосходя сплавы системы Al-Mn, однако уступает им в пластичности, тепло- и электропроводности.

Поэтому, например, при производстве проводов применяют такие сплавы, как E-AlMgSi (алдрей) [2,3] и AlTi_{0.1} [4,5]. Сплаву E-AlMgSi (алдрей) присущи высокая прочность, хорошая пластичность, а после соответствующей термической обработки он приобретает высокую электропроводность. Так как сплав отличается малой плотностью (вдвое легче меди при прочности на разрыв в полтора раза выше [2]), химически инертен к изменениям внешней среды, имеет высокую теплопроводность, то из-за большой твердости сплава провода из него имеют низкую вероятность повреждения при монтаже, поэтому могут крепиться на более удаленные друг от друга опоры.

Для выяснения закономерностей поведения алюминия и легирующих элемен-

тов при образовании сплава наиболее подходящими являются бинарные системы в силу мало вариантности их составов. К таким сплавам относятся антифрикционные самосмазывающиеся сплавы $Al_{100-x}Sn_x$ [15-18] и $Al_{100-x}Zn_x$ [12,19,20]. Они используются при производстве подшипников, их эксплуатация и выяснение связи структурных изменений сплава и его внутреннего строения с температурными изменениями внешней среды требуют знания индивидуальных теплофизических характеристик компонентов [12].

Таким образом, алюминий и его сплавы с разными металлами являются стратегическим материалом для решения целого ряда научных и практических задач, представляющих интерес для физики твердого тела, в частности, для развития теории конденсированного состояния. В силу того, что термодинамическое равновесие является предельным состоянием вещества, то целью данной работы является:

- определение температурных зависимостей теплофизических свойств алюминия, а также олова и цинка (металлы из соседних групп) в случае равновесного конденсированного состояния.
- проверка эффекта наследования сплавом некоторых свойств его компонентов путем проведения прогностических оценочных расчетов теплоемкостей сплавов $Al_{60}Sn_{40}$ и $Al_{95}Zn_5$ с использованием правила смешения.

Основные положения модели существования двух идеальных фаз с различными параметрами порядка

Зачастую при экспериментальном исследовании характеристик материала наблюдается разброс значений физических величин у разных авторов [11]. Причиной расхождений являются различия в: состояниях образцов; их предварительной обработке (отпуск закаленных металлов, пластическая деформация, вакуумирование и т. п.); наличии в них летучих примесей; используемой для изме-

рений аппаратуре; реализации разных внутренних кинетических процессов. В этой связи для проведения расчета теплофизических свойств металлов был произведен отбор надежных и согласованных между собой экспериментальных массивов данных. На нижеприведенных рисунках эти данные обозначены: черными квадратами – [21], черными кружками – [22], белыми треугольниками – [23], белыми кружками – [24], черными треугольниками – [25], белыми квадратами – [26], черными ромбиками – [27].

Для аппроксимации экспериментальных данных были использованы функции, полученные в рамках авторской модели двухфазной локально-равновесной области [28]. Обозначив через x – объемную долю первой более упорядоченной фазы, μ_i – химический потенциал фазы i ($i=1,2$), получим для сосуществующих идеальных фаз плотность энергии Гиббса неравновесного состояния в виде [29]

$$g = \mu_1 x + \mu_2 (1 - x), \quad (2)$$

где

$$\mu_i(P, T, t) = \mu_{i0}(P, T, t) + k_B T \ln x_i(T, t), \quad (3)$$

$\mu_{i0}(P, T, t)$ – стандартные значения химических потенциалов для каждой из фаз, P – давление, T – температура, t – время, k_B – постоянная Больцмана, $x_2 = 1 - x$.

Минимизируя (2) по параметру порядка $\eta = x_1 - x_2 = 2x - 1$, получим при постоянном давлении P в равновесном состоянии (независимость величин от времени t) температурную функцию объемной доли первой фазы

$$x(T) = 0.5[1 - \text{th}(\varphi(T)/T)], \quad (4)$$

здесь аргумент $\varphi(T) = 0.5\Delta\mu_0(T)/k_B$, а величина $\Delta\mu_0 = \mu_{10} - \mu_{20}$. Разложив функцию $\varphi(T)$ из (4) в ряд Тейлора вблизи точки экстремального теплового эффекта фазового перехода T_x с сохранением только линейных членов ряда, получим

$$x(T) = 0.5[1 - \text{th}(b(T_x - T)/T)], \quad (5)$$

где параметр $b(q) = -\partial\varphi/\partial T$, q – скорость нагрева образца. Параметр модели b связан с температурой $T_x(q)$, при которой наблюдается максимум первой производной от объемной доли фазы 1 $u_x(q) = (dx/dT)_{T=T_x}$ и экстремум теплоты фазового перехода с учетом (5), соотношением

$$b(q) = 2 \cdot T_x(q) \cdot u_x(q). \quad (6)$$

Энтропия. Вычислив полную производную от (2), взятую со знаком минус, найдем выражение для субстанциональной энтропии области

$$\sigma = -dg/dT = \sigma_x + \varepsilon_T u, \quad (7)$$

где локальная энтропия σ_x при фиксированном фазовом составе x определяется классической формулой [30,31], т. е. частной производной от (2) по температуре

$$\sigma_x = -(\partial g/\partial T)_x = \sigma_m + \sigma_d x + \sigma_s, \quad (8)$$

здесь энтропии: $\sigma_m = -\partial\mu_{20}/\partial T$, различия фаз $\sigma_d = -[\partial(\Delta\mu_0)/\partial T]$ и смещения

$$\sigma_s = -k_B[x \ln x + \lambda(1-x) \ln(1-x)];$$

плотность энергии сосуществования фаз $\varepsilon_T = -(\partial g/\partial x)_T = -\Delta\mu_0 - k_B T \ln[x/(1-x)]$, (9) $u = dx/dT$ – «скорость» изменения фазового состава x при тепловом переходе в новое состояние. Локально-равновесная энтропия (8) совпадает с ее субстанциональным определением (7) при выполнении равенства $\varepsilon_T = 0$, порождающим формулу (5).

Теплоемкость. Вычислив произведение температуры T на полную производную по температуре от энтропии (7) для состояния термодинамического равновесия, находим субстанциональную теплоемкость

$$C(T, x, u) = T(d\sigma/dT) = C_b + C_k, \quad (10)$$

где

$$C_b = k_1(T) + k_2(T)x \quad (11)$$

– локальная теплоемкость, описывающая температурную зависимость (базисную линию) в выделенной точке образца и ее малой окрестности. Первое слагаемое в

формуле (11) характеризует вклад электроподобных подсистем, а второе – атомарноподобных. Отметим, что при достаточно больших значениях параметра b (6) второе слагаемое отображает на графике конечный скачок физической характеристики, соответствующий структурному переходу. Теплоемкость

$$C_k = k_3(T)u \quad (12)$$

связана с фазовыми превращениями и переходами: фазовые переходы I рода изображаются в виде пиков и ям с округлыми вершинами; фазовые переходы II рода – в виде пиков и ям с острыми вершинами; полиморфные превращения – в виде чередования пиков и ям.

В отличие от предыдущих работ автора в данной статье учитывается линейная зависимость коэффициентов модели от температуры

$$k_v(T) = k_{v0} + k_{v1}T, \quad v = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Например, в работах [29,32-35] и других для расчета тепловых свойств разнообразных по своей физико-химической природе веществ использовалась модель с коэффициентами $k_{10} = k_{21} = k_{30} = 0$ и аналогичных им параметров для других свойств. В данной работе приближение теоретической кривой к экспериментальным данным осуществлялось только при $k_{10} = 0$ и аналогичных ему коэффициентов для других характеристик.

Коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР). Воспользовавшись вторым соотношением Грюнайзена (см., например, [27, с.46; 36]) о связи теплоемкости с КТЛР, равенствами (10)-(12) и учитывая размерности характеристик, запишем

$$\alpha_L \cdot 10^6 = q_1(T) + q_2(T)u + q_3(T)v, \quad (14)$$

здесь величины u и v соответствуют аргументам x и u . Коэффициент теплового объемного расширения можно оценить по формуле

$$\alpha_V = \kappa \cdot \alpha_L, \quad (15)$$

где коэффициент κ приблизительно равен 3.

Плотность. Вычисления плотности d металлов проводились согласно модифицированной автором формуле из [31]

$$d = d_0[1 + \alpha_V(293 - T)] + \Delta d, \quad (16)$$

добавленное слагаемое Δd в равенстве (16) задает скачки плотности при фазовых переходах.

Теплопроводность. Теплопроводность характеризует распространение тепла в материале, причем в окрестности абсолютного нуля на температурной зависимости теплопроводности наблюдается пик. Используя соотношение типа уравнения Дебая (1), можно записать аппроксимационную функцию для теплопроводности в виде

$$\lambda = g_1(T) + g_2(T)z + g_3(T)w, \quad (17)$$

здесь величины z и w соответствуют аргументам x и u .

Температуропроводность. Для проверки согласованности вычисленных значений теплофизических характеристик вычислялась температуропроводность металла по равенству [38, с. 8]

$$a = \lambda \cdot M_a / (C \cdot d), \quad (18)$$

где M_a , 10^{-3} (kg/mol) – атомная масса.

Удельное электросопротивление. Исходя из развитого подхода аппроксимационная функция для удельного электросопротивления была выбрана в виде

$$\rho \cdot 10^8 = s_1(T) + s_2(T)z + s_3(T)p, \quad (19)$$

здесь величины s и p соответствуют аргументам x и u .

Результаты расчетов и их обсуждение

Согласно формулам (10), (14), (16), (17) и (19) в табл. 1-3 приведены теоретические функции для описания температурных зависимостей теплофизических характеристик алюминия, олова и цинка соответственно.

На рис. 1 показан температурный ход кривых теплоемкостей алюминия, олова и цинка. На графиках пики с округлыми вершинами отвечают агрегатному переходу из кристаллического состояния в жидкое: Al ($T_m = 933.5$ K), Sn ($T_m = 504.05$ K) и Zn ($T_m = 692.68$ K).

Таблица 1 / Table 1

Аппроксимационные функции для алюминия / Approximation functions for aluminum

Функции и свойства
<i>Теплоемкость</i>
$C = 0.0027 \cdot T + 36.7 \cdot x + T \cdot [1.48 \cdot u_1 + 0.1 \cdot u_2 + 0.36 \cdot u_3];$
$x = \{1 - \text{th}[0.56 \cdot (148/T - 1)]\}/2; u_1 = dx_1/dT; x_1 = \{1 - \text{th}[3.6 \cdot (890/T - 1)]\}/2;$
$u_2 = dx_2/dT; x_2 = \{1 - \text{th}[23.8 \cdot (895/T - 1)]\}/2; u_3 = dx_3/dT; x_3 = \{1 - \text{th}[5 \cdot (1248/T - 1)]\}/2$
<i>КТЛР</i>
$\alpha_L \cdot 10^6 = 0.009 \cdot T + 32 \cdot y + T \cdot [-0.5 \cdot v_1 + 1.4 \cdot v_2]; y = \{1 - \text{th}[0.6 \cdot (154/T - 1)]\}/2;$
$v_1 = dy_1/dT; y_1 = \{1 - \text{th}[9.7 \cdot (450/T - 1)]\}/2; v_2 = dy_2/dT; y_2 = \{1 - \text{th}[4.6 \cdot (933.5/T - 1)]\}/2$
<i>Плотность</i>
$d = 2695 \cdot [1 + 2.3 \cdot \alpha_L \cdot 10^{-6} \cdot (293 - T)] - 213 \cdot x_d; x_d = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (933.5/T - 1)]\}/2$
<i>Теплопроводность</i>
$\lambda = 0.05 \cdot T + 178 \cdot z - 128 \cdot z_1 + T \cdot [12000 \cdot w_2 + 29 \cdot w_3 + 63 \cdot w_4 - 2.4 \cdot w_5];$
$z = \{1 - \text{th}[0.76 \cdot (10/T - 1)]\}/2; z_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (933.5/T - 1)]\}/2;$
$w_2 = dz_2/dT; z_2 = \{1 - \text{th}[2.1 \cdot (13/T - 1)]\}/2; w_3 = dz_3/dT; z_3 = \{1 - \text{th}[1.1 \cdot (188/T - 1)]\}/2;$
$w_4 = dz_4/dT; z_4 = \{1 - \text{th}[1.3 \cdot (533/T - 1)]\}/2; w_5 = dz_5/dT; z_5 = \{1 - \text{th}[7.6 \cdot (1860/T - 1)]\}/2$
<i>Удельное электросопротивление</i>
$\rho \cdot 10^8 = 0.005 \cdot T + 1.3 \cdot s + 0.4 \cdot s_1 + 0.0083 \cdot T \cdot p_2; s = \{1 - \text{th}[3.4 \cdot (212/T - 1)]\}/2;$
$s_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (933.5/T - 1)]\}/2; p_2 = ds_2/dT; s_2 = \{1 - \text{th}[0.8 \cdot (789/T - 1)]\}/2$

Таблица 2 / Table 2

Теоретические функции для олова / Theoretical functions for tin

Функции и свойства
<i>Теплоемкость</i>
$C = 0.0002 \cdot T + 38.8 \cdot x + T \cdot [0.64 \cdot u_1 + 1.1 \cdot u_2 + 0.2 \cdot u_3]$; $x = \{1 - \text{th}[0.49 \cdot (70/T - 1)]\}/2$;
$u_1 = dx_1/dT$; $x_1 = \{1 - \text{th}[6.9 \cdot (358/T - 1)]\}/2$; $u_2 = dx_2/dT$; $x_2 = \{1 - \text{th}[6.3 \cdot (504.05/T - 1)]\}/2$;
$u_3 = dx_3/dT$; $x_3 = \{1 - \text{th}[3.2 \cdot (750/T - 1)]\}/2$
<i>КТЛР*</i>
$\alpha_L \cdot 10^6 = 0.015 \cdot T + 26 \cdot y + 10 \cdot T \cdot v_1$; $y = \{1 - \text{th}[0.34 \cdot (84/T - 1)]\}/2$;
$v_1 = dy_1/dT$; $y_1 = \{1 - \text{th}[2.4 \cdot (504.05/T - 1)]\}/2$
<i>Плотность</i>
$d = 7305 \cdot [1 + 2.6 \cdot \alpha_L \cdot 10^{-6} \cdot (293 - T)] - 216 \cdot x_d$; $x_d = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (504.05/T - 1)]\}/2$
<i>Теплопроводность</i>
$\lambda = 0.0002 \cdot T + 69 \cdot z - 33.2 \cdot z_1 + T \cdot [490 \cdot w_2 + 5 \cdot w_3 - 2 \cdot w_4 - 0.064 \cdot z_5 + 0.082 \cdot z_6]$;
$z = \{1 - \text{th}[6.2 \cdot (10/T - 1)]\}/2$; $z_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (504.05/T - 1)]\}/2$;
$w_2 = dz_2/dT$; $z_2 = \{1 - \text{th}[1.6 \cdot (15/T - 1)]\}/2$; $w_3 = dz_3/dT$; $z_3 = \{1 - \text{th}[1.1 \cdot (178/T - 1)]\}/2$;
$w_4 = dz_4/dT$; $z_4 = \{1 - \text{th}[3.9 \cdot (990/T - 1)]\}/2$; $z_5 = \{1 - \text{th}[1.3 \cdot (300/T - 1)]\}/2$;
$z_6 = \{1 - \text{th}[1.3 \cdot (600/T - 1)]\}/2$
<i>Удельное электросопротивление</i>
$\rho = 0.03 \cdot T + 24.4 \cdot s + 27 \cdot s_1 - T \cdot [1.1 \cdot p_2 + 0.018 \cdot s_3]$;
$s = \{1 - \text{th}[0.8 \cdot (750/T - 1)]\}/2$; $s_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (504.05/T - 1)]\}/2$;
$p_2 = ds_2/dT$; $s_2 = \{1 - \text{th}[2.8 \cdot (800/T - 1)]\}/2$; $s_3 = \{1 - \text{th}[0.8 \cdot (789/T - 1)]\}/2$

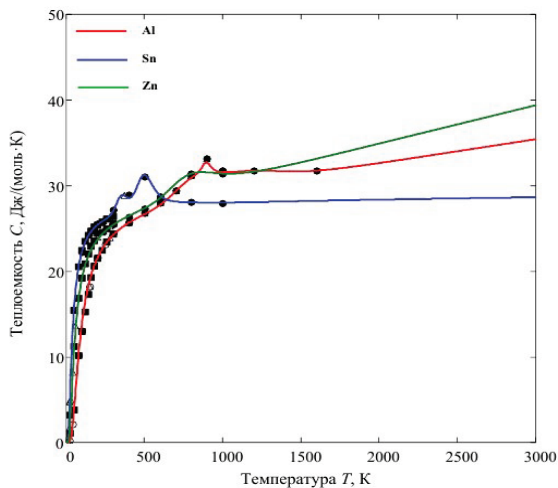


Рис. 1. Температурные зависимости теплоемкостей металлов

Fig. 1. Temperature dependences of heat capacities of metals

Из рис. 1 видно, что до температуры 500 К наибольшей теплоемкостью обладает олово, а в жидком состоянии после температуры ~ 1300 К доминирует теплоемкость цинка, пере-

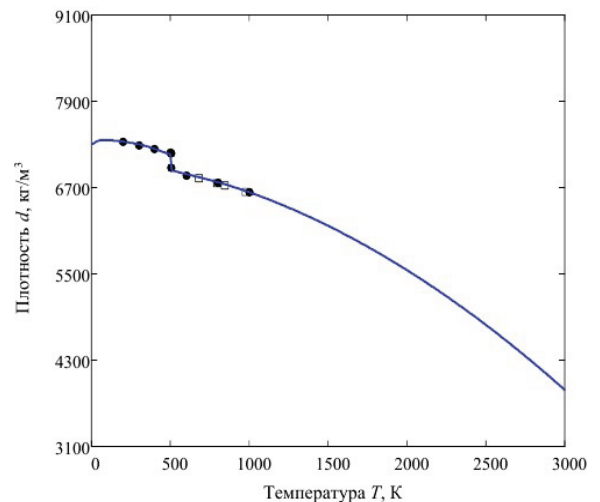


Рис. 2. Зависимость плотности олова от температуры

Fig. 2. Temperature dependence of tin density

ходящего при $T_g = 1180.15$ К в газообразное состояние, при этом алюминий ($T_g = 2792$ К) и олово ($T_g = 2893$ К) остаются жидкими.

На рис. 2 показано температурное по-

ведение плотности олова. Из графика видно: при температуре агрегатного перехода кристалл-жидкость $T_m = 504.05$ К на темпера-

турной зависимости плотности наблюдается конечный скачок, а на графике теплоемкости (рис. 1) – пик с округлой вершиной.

Таблица 3 / Table 3

Расчетные зависимости для цинка / Calculated dependencies for zinc

Функции и свойства
<i>Теплоемкость</i>
$C = 0.0044 \cdot T + 35 \cdot x + 1.2 \cdot T \cdot u_1$; $x = \{1 - \text{th}[0.56 \cdot (88/T - 1)]\}/2$;
$u_1 = dx_1/dT$; $x_1 = \{1 - \text{th}[3.8 \cdot (830/T - 1)]\}/2$
<i>КТЛР</i>
$\alpha_L \cdot 10^6 = 0.0045 \cdot T + 34.7 \cdot y + T \cdot v_1$; $y = \{1 - \text{th}[0.95 \cdot (56/T - 1)]\}/2$;
$v_1 = dy_1/dT$; $y_1 = \{1 - \text{th}[6.4 \cdot (692.68/T - 1)]\}/2$
<i>Плотность</i>
$d = 7149 \cdot [1 + 3.1 \cdot \alpha_L \cdot 10^{-6} \cdot (293 - T)] - 40 \cdot x_d$; $x_d = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (692.68/T - 1)]\}/2$
<i>Теплопроводность</i>
$\lambda = 0.026 \cdot T + 67 \cdot z - 84 \cdot z_1 + T \cdot [9900 \cdot w_2 + 42 \cdot w_3 + 7.8 \cdot w_4 + 0.048 \cdot z_5]$;
$z = \{1 - \text{th}[1.7 \cdot (6/T - 1)]\}/2$; $z_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (692.68/T - 1)]\}/2$;
$w_2 = dz_2/dT$; $z_2 = \{1 - \text{th}[2 \cdot (5.8/T - 1)]\}/2$; $w_3 = dz_3/dT$; $z_3 = \{1 - \text{th}[1.2 \cdot (326/T - 1)]\}/2$;
$w_3 = dz_3/dT$; $z_3 = \{1 - \text{th}[1.6 \cdot (530/T - 1)]\}/2$; $z_5 = \{1 - \text{th}[19 \cdot (753/T - 1)]\}/2$
<i>Удельное электросопротивление</i>
$\rho = 0.019 \cdot T + 2.3 \cdot s + 23.1 \cdot s_1 + T \cdot [-0.6 \cdot p_2 + 1.3 \cdot p_3 - 0.008 \cdot s_4]$;
$s = \{1 - \text{th}[1.0 \cdot (354/T - 1)]\}/2$; $s_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (692.68/T - 1)]\}/2$;
$p_2 = ds_2/dT$; $s_2 = \{1 - \text{th}[2.5 \cdot (240/T - 1)]\}/2$; $p_3 = ds_3/dT$; $s_3 = \{1 - \text{th}[3.3 \cdot (692.68/T - 1)]\}/2$;
$s_4 = \{1 - \text{th}[3.5 \cdot (692.68/T - 1)]\}/2$

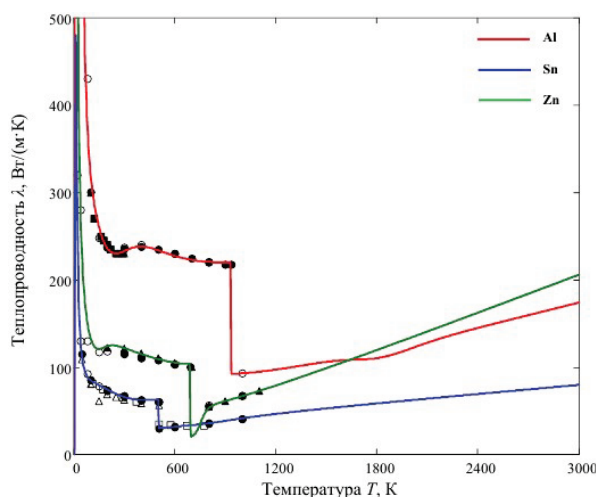


Рис. 3. Температурные функции теплопроводностей компонентов сплавов

Fig. 3. Temperature functions of thermal conductivities of alloy components

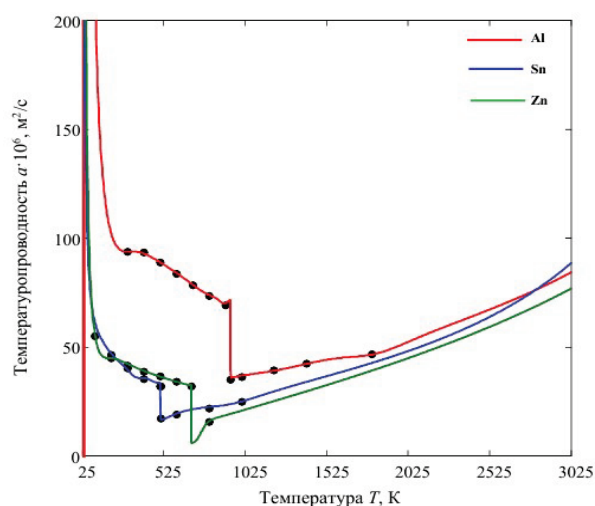


Рис. 4. Изменения температуропроводностей металлов в зависимости от температуры

Fig. 4. Changes in thermal conductivities of metals as a function of temperature

Рис. 3. отображает графики теплопроводностей металлов в зависимости от температуры. Конечные скачки на графиках функций отвечают агрегатным переходам кристалл-жидкость. Ямы на кривых теплопроводностей алюминия и цинка в диапазоне температур 100-220 К требуют дополнительных экспериментальных исследований по структурным превращениям или возможным структурным неоднородностям, образующимся в процессе кристаллизации.

Для проверки согласованности использованных экспериментальных данных и проведенных теоретических результатов расчетов по формуле (18) были вычислены температуропроводности алюминия, олова и цинка (рис. 4). Рис. 4 демонстрирует полную

адекватность предложенного аппроксимационного подхода при вычислении теплофизических свойств исследованных металлов.

В табл. 4-6 дана сводка вычисленных теплофизических характеристик алюминия, олова и цинка соответственно.

Создание металлических сплавов с заданными свойствами в равновесном или неравновесном состояниях требует:

- знания индивидуальных теплофизических характеристик металлов, входящих в состав сплава;
- умения оценивать и прогнозировать характеристики сплава по данным о его составляющих металлах (см., например, [33]) с учетом определенных правил;

Таблица 4 / Table 4

Теплофизические характеристики алюминия ($T_m = 933.5$ К; $T_g = 2792$ К)

Thermophysical characteristics of aluminum ($T_m = 933.5$ К; $T_g = 2792$ К)

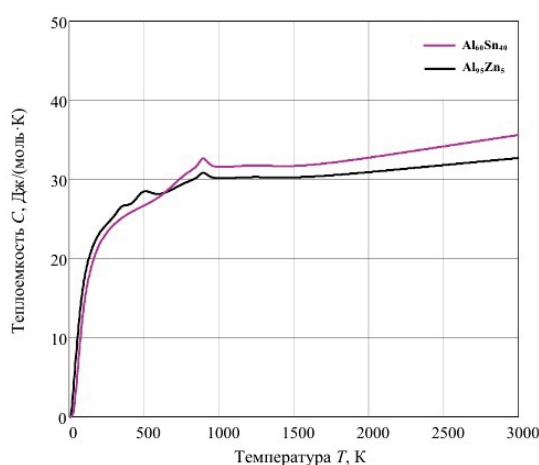
T , К	C , Дж/(моль·К)	$\alpha_L \cdot 10^6$, К ⁻¹	d , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м
50	3.81	2.89	2699	676.39	1773.76	0.25
100	13.80	11.89	2709	308.05	222.27	0.50
200	21.54	19.99	2707	221.70	102.59	1.53
300	24.23	23.24	2694	227.72	94.13	2.82
400	25.65	24.44	2679	237.78	93.37	3.83
500	26.65	25.84	2662	234.79	89.30	4.95
600	27.74	28.16	2641	228.37	84.09	6.16
700	29.33	30.01	2619	223.54	78.51	7.40
800	30.91	32.59	2593	221.02	74.41	8.65
900	32.68	34.70	2564	220.39	70.95	9.90
933.5	32.05	35.03	2449	160.50	55.17	10.51
1000	31.58	35.23	2328	101.12	37.12	11.54
1200	31.76	35.50	2282	105.25	39.18	14.01
1400	31.65	36.78	2230	111.18	42.50	16.46
1600	31.74	38.47	2170	115.88	45.38	18.89
1800	32.13	40.27	2106	118.22	47.15	21.31
2000	32.63	42.10	2037	129.20	52.46	23.73
2200	33.17	43.93	1963	142.12	58.90	26.14
2400	33.73	45.76	1884	152.84	64.88	28.54
2600	34.29	47.59	1801	162.66	71.05	30.95
2792	34.83	49.35	1718	171.87	77.52	33.25

Таблица 5 / Table 5

Теплофизические величины олова ($T_m = 504.05$ К; $T_g = 2893$ К)

Thermophysical values of tin

T , К	C , Дж/(моль·К)	$\alpha_L \cdot 10^6$, К ⁻¹	d , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м
50	15.66	10.80	7355	110.05	112.95	1.50
100	22.25	15.21	7361	85.15	61.45	3.00
200	25.42	18.61	7338	74.31	47.13	6.26
300	27.07	23.48	7302	65.92	39.63	10.66
400	28.65	32.89	7238	62.62	35.81	15.53
500	31.23	36.18	7163	63.28	33.65	19.69
504.05	31.22	36.15	7052	46.75	25.27	33.33
600	28.81	34.43	6888	32.24	19.30	49.77
700	28.13	32.95	6834	34.30	21.36	52.34
800	28.05	32.58	6775	35.51	22.40	54.99
900	28.02	32.97	6709	36.59	23.30	57.68
1000	28.02	33.80	6635	38.82	24.95	60.19
1200	28.07	36.08	6467	45.00	29.59	64.59
1400	28.14	38.75	6274	50.26	33.99	68.44
1600	28.22	41.57	6057	54.64	38.21	71.99
1800	28.29	44.47	5816	58.61	42.63	75.38
2000	28.35	47.41	5552	62.40	47.49	78.66
2200	28.42	50.36	5265	66.07	52.99	81.88
2400	28.48	53.34	4955	69.68	59.34	85.06
2600	28.53	56.32	4621	73.24	66.83	88.20
2800	28.59	59.30	4265	76.78	75.86	91.32
2893	28.61	60.69	4092	78.41	80.74	92.77

Рис. 5. Оценки температурного поведения теплоемкостей сплавов $\text{Al}_{60}\text{Sn}_{40}$ и $\text{Al}_{95}\text{Zn}_5$ Fig. 5. Estimates of temperature behavior of heat capacities of $\text{Al}_{60}\text{Sn}_{40}$ and $\text{Al}_{95}\text{Zn}_5$ alloys

– учета эффекта наследования (см., например, [34,35]) сплавом особенностей поведения его компонентов;

– исследований структурной, тепловой и временной устойчивостей.

Таким образом, данная работа является развитием теоретического доопытного анализа создания требуемого сплава.

При смешении идеальных фаз с атомными (массовыми) долями n_i ($i=1,2$) теплофизическое свойство системы A можно вычислить по правилу:

$$A = n_1 \cdot A_1 + n_2 \cdot A_2, \quad (20)$$

где A_i – соответствующее свойство фазы i . Проведем с использованием правила смешения (20) прогностические оценочные расчеты теплоемкостей антифрикционных са-

Таблица 6 / Table 6

Теплофизические свойства цинка ($T_m = 692.68 \text{ K}$; $T_g = 1180.15 \text{ K}$)Thermal properties of zinc ($T_m = 692.68 \text{ K}$; $T_g = 1180.15 \text{ K}$)

T , К	C , Дж/(моль·К)	$\alpha_L \cdot 10^6$, К ⁻¹	d , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м
50	10.69	15.61	7233	191.44	161.88	0.95
100	19.11	24.66	7254	119.09	56.16	1.91
200	23.69	28.56	7208	117.14	44.85	3.50
300	25.41	29.95	7144	117.36	42.28	6.18
400	26.46	30.84	7076	111.79	39.05	8.79
500	27.35	31.66	7004	106.66	36.41	11.43
600	28.54	33.72	6920	102.99	34.11	13.66
692.68	30.10	35.86	6811	60.28	19.22	25.72
700	30.23	35.86	6786	18.81	6.00	37.26
800	31.40	34.67	6719	51.04	15.82	36.94
900	31.55	34.22	6649	59.71	18.62	36.92
1000	31.41	34.42	6570	65.44	20.74	37.33
1180.15	31.58	35.17	6418	76.58	24.71	38.70

мосмазывающихся сплавов $\text{Al}_{60}\text{Sn}_{40}$ и $\text{Al}_{95}\text{Zn}_5$ (рис. 5).

На рис. 5 отображаются пики агрегатных переходов компонентов сплава, что указывает на эффект наследования свойств исходных металлов. Отметим, что до температуры плавления алюминия между теплоемкостями сплавов $\text{Al}_{60}\text{Sn}_{40}$ и $\text{Al}_{95}\text{Zn}_5$ различия практически отсутствуют. Это указывает на схожесть термодинамических величин, рассчитываемых по температурным зависимостям теплоемкостей. Аналогично по правилу смешения можно оценить и другие теплофизические свойства сплавов. Для определения надежности полученных оценок характеристик необходимы экспериментальные данные по теплоемкостям вышеприведенных сплавов.

Применение правила смешения к другим бинарным сплавам вида металл-металл (см., например, [39]) демонстрирует достато-

чно хорошее приближение теоретической кривой к экспериментальным результатам.

Заключение

Расчет теплофизических свойств металлов является одной из приоритетных составляющих термодинамической модели конденсированной среды. Знание этих характеристик позволит находить интервалы временной, тепловой и структурной устойчивостей, вычислять времена релаксации неравновесных состояний, решать термokinетические задачи, проводить прогностические оценки теплофизических величин сплавов по данным об их компонентах. Кроме того, хранение и использование информации в виде аналитических выражений значительно ускоряет как обработку данных, так и решение практических задач.

Библиографический список / References

1. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2013. 81 с.
Lucz A.R., Suslina A.A. Alyuminij i ego

splavy. Samara: Samar. gos. tex. un-t; 2013. 81 p.

2. Ганиев И.Н., Алиев Ф.А., Одиназода Х.О., Сафаров А.М., Джайлоев Дж.Х.

Теплоемкость и термодинамические функции алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (алдрей), легированного галлием. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2019; 22(3): 219—227. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-3-219-227>.

Ganiev I.N., Aliev F.A., Odiazoda H.O., Safarov A.M., Jayloev J.H. Heat capacity and thermodynamic functions of aluminum conductive alloy E-Al MgSi (Aldrey) doped with gallium. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2019; 22(3): 219—227. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-3-219-227>.

3. Ганиев И.Н., Абулаков А.П., Джайлоев Дж.Х., Якубов У.Ш., Сафаров А.Г., Абулхаев В.Д. Влияние добавок висмута на теплофизические и термодинамические свойства алюминиевого проводникового сплава E-AlMgSi (алдрей). *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2020; 23(1): 86—93. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2020-1-86-93>.

Ganiev I.N., Abdulakov A.P., Jayloev J. H., Yakubov U.Sh., Safarov A.G., Abulkhaev V.D. Influence of bismuth additives on the thermophysical and thermodynamic properties of aluminum conductive alloy E-AlMgSi (Aldrey). *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2020; 23(1): 86—93. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2020-1-86-93>.

4. Ганиев И.Н., Файзуллоев Р.Дж., Зокиров Ф.Ш., Ганиева Н.И. Температурные зависимости теплоемкости и термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi_{0.1} со стронцием. *Теплофизика высоких температур*. 2023; 61(3): 376—381. <https://doi.org/10.31857/S0040364423030110>.

Ganiev I. N., Faizulloev R. Zh., Zokirov F. Sh., Ganieva N. I. Temperature dependences of the heat capacity and thermodynamic functions of aluminum conducting alloy AlTi_{0.1}

with strontium. *High Temperature*, 61:3 (2023), 344–349. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0018151X23030124>.

5. Ганиев И.Н., Рахматуллоева Г.М., Зокиров Ф.Ш., Эшов Б.Б., Аминова Н.А., Худойбердизода С.У. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого проводникового сплава AlTi_{0.1} с натрием. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2024; 1: 34—42. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2024-1-34-42>.

Ganiev I.N., Raxmatulloeva G.M., Zokirov F.Sh., E`shov B.B., Aminova N.A., Xudoyberdizoda S.U. Temperaturayaya zavisimost` teploemkosti i izmenenij termodinamicheskikh funkciy alyuminievgogo provodnikovogo splava AlTi_{0.1} s natriem. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta*. 2024; 1: 34—42. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2024-1-34-42>.

6. Palm M., Zhang L., Stein F., Sauthoff G. Phases and phase equilibria in the Al-rich part of the Al–Ti system above 900 °C. *J. Intermetallics*. 2002; 10(6): 523—540. doi:10.1016/S0966-9795 (02)00022-5.

7. Ганиев И.Н., Рахимов М.Р., Отаджонов С. Э., Исмоилова М.Х., Худойбердизода С.У. Влияние лития на температурную зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АК1 на основе особо чистого алюминия. *Вопросы материаловедения*. 2023; 4 (116): 42—49. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2023-116-4-42-49>.

Ganiev I.N., Rakhimov M.R., Otadzhoнов S.E., Ismoilova M.Kh., Khudoyberdizoda S.Yu. Influence of lithium on the temperature dependence of heat capacity and thermodynamic functions changes in AK1 alloy based on high-purity aluminum. *Voprosy Materialovedeniya*. 2023; 4 (116): 42–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2023-116-4-42-49>.

8. Ганиев И.Н., Шарипова Х.Я., Одиназода Х.О., Иброхимов Н.Ф., Ганиева Н.И.

Теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиево-магниевого сплава АМг2 с индием. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019; 17(4): 34—43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>.

Ganiev I.N., Sharipova X.Ya., Odinzoda X.O., Ibroximov N.F., Ganieva N.I. Teplofizicheskie svoystva i termodinamicheskie funktsii alyuminievo-magnievogo splava AMg2 s indiem. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2019; 17(4): 34—43. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>.

9. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2005. 376 с.

Zolotorevskij V.S., Belov N.A. Metallovedenie litejny'x alyuminievy'x splavov. Moscow: MISiS; 2005. 376 p. (In Russ.).

10. Абдукадырова И.Х., Байтелесов С. А. Температурная и дозовая зависимость теплофизических свойств некоторых конструкционных алюминиевых сплавов. *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2011; 1(93): 89—95.

Abdukady'rova I.X., Bajtelesov S.A. Temperaturnaya i dozovaya zavisimost' teplofizicheskix svoystv nekotory'x konstrukcionny'x alyuminievy'x splavov. *Mezhdunarodny'j nauchny'j zhurnal «Al'ternativnaya e'nergetika i e'kologiya»*. 2011; 1(93): 89—95. (In Russ.) EDN: NVWC FB.

11. Низомов З., Мирзоев Ф.М., Акрамов М.Б., Саидов Р.Х. Температурная зависимость теплофизических свойств алюминия марки А5. *Доклады академии наук республики Таджикистан*. 2014; 57(2): 140—144.

Nizomov Z., Mirzoev F.M., Akramov M. B., Saidov R.X. Temperaturnaya zavisimost' teplofizicheskix svoystv alyuminiya marki A5. *Doklady' akademii nauk respubliky Tadjzhikistan*. 2014; 57 (2): 140—144. (In Russ.)

12. Ростовцев Р.Н., Ростовцев Г.Р. Структурные и термодинамические харак-

теристики сплавов системы Al-Zn. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024; 7(145): 1—8. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.40>.

Rostovcev R.N., Rostovcev G.R. Strukturny'e i termodinamicheskie karakteristiki splavov sistemy' Al-Zn. *Mezhdunarodny'j nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2024; 7(145): 1—8. (In Russ.) <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.40>.

13. Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Асоев М. Дж., Якубов У.Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплофизических свойств и термодинамических функций сплавов системы Al-Sn. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2021; 1(35): 35—41.

Ganiev I.N., Safarov A.G., Asoev M.Dzh., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperaturnaya zavisimost' teplofizicheskix svoystv i termodinamicheskix funktsij splavov sistemy' Al-Sn // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2021; 1(35): 35—41. (In Russ.)

14. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. М.: Мир, 1979. 286 с.

R. Berman. Thermal Conduction in Solids. Oxford: Clarendon Press, 1976. 193 p.

15. Abed E.J. Study of solidification and mechanical properties of Al-Sn casting alloys. *Asian Trans. Eng.* 2012. V. 2. P. 89—98.

16. Русин Н.М., Скорентцев А.Л. Спекание как метод получения прочных композитов Al-Sn с большим содержанием второй фазы. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия* 2017; 1: 20—28. <https://dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-20-28>.

Rusin N.M., Skorentsev A.L. Spekanie kak metod polucheniya prochnykh kompozitov Al-Sn s bol'shim soderzhaniem vtoroi fazy. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017; 1: 20—28. (In Russ.) <https://dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-20-28>.

17. Rusin N.M., Skorentsev A.L., Kolu-baev E.A. Effect of equal channel angular pressing on mechanical and tribological properties of

sintered Al–Sn composites. *J. Mater. Eng. Perf.* 2020; 29: 1955—1963.

18. Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Акимов К.О. Сплав Al–40Sn, полученный методом селективного лазерного сплавления смеси элементарных порошков. *Физика металлов и металловедение*. 2023; 124(9): 846—853. <https://dx.doi.org/10.31857/S0015323023600818>.

Rusin N.M., Skorentsev A.L., Akimov K. O. Al–40Sn Alloy Produced by Selective Laser Melting of Elemental Powder Mixtures. *Physics of Metals and Metallography*. 2023; 124: 908—915. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0031918X23601476>.

19. Коржавый П.А., Смирнова Е.А., Эйбельман И.А., Абрикосов И.А., Рубан А.В., Векилов Ю.Х. Природа изоструктурного спинодального распада в системе Al–Zn. *Физика твердого тела*. 1997; 39(4): 593—596.

Korzhavyj P.A., Smirnova E.A., Ejbelman I.A., Abrikosov I.A., Ruban A.V., Vekilov Yu.X. Priroda izostruktornogo spinodal'nogo raspada v sisteme Al–Zn. *Fizika tverdogo tela*. 1997; 39(4): 593—596. (In Russ.)

20. Камболов Д.А. Поверхностные свойства расплавов на основе свинца, цинка, олова и образование микро(нано)фаз при их взаимодействии с медью, алюминием и специальными сталями / Дисс. ... канд. техн. наук. Нальчик: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). 2014. 138 с.

Kambolov D.A. Poverxnostny'e svojstva rasplavov na osnove svincza, cinka, olova i obrazovanie mikro(nano)faz pri ix vzaimodejstvii s med'yu, alyuminiem i special'ny'mi stalyami / Diss. ... kand. texn. nauk. Nal'chik: Severo-Kavkazskij gorno-metallurgicheskij institut (gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet), 2014. 138 p. (In Russ.)

21. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.

Noviczkiy L.A., Kozhevnikov I.G. Teplofizicheskie svojstva materialov pri nizkix tempe-

raturax. Spravochnik. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 216 p. (In Russ.)

22. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Metallurgiya, 1989. 384 с.

Zinov'ev V.E. Teplofizicheskie svojstva metallov pri vy'sokix temperaturax. Moscow: Metallurgiya, 1989. 384 p. (In Russ.)

23. Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 437 с.

Larikov L.N., Yurchenko Yu.F. Struktura i svojstva metallov i splavov. Teplovy'e svojstva metallov i splavov. Spravochnik. Kiev: Naukova dumka, 1985. 437 p. (In Russ.)

24. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Fizicheskie velichiny'. Spravochnik / Pod red. I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejlixova. Moscow: E'nergoatomizdat, 1991. 1232 p. (In Russ.)

25. Зиновьев В.Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. М.: Metallurgiya, 1984. 200 с.

Zinov'ev V.E. Kineticheskie svojstva metallov pri vy'sokix temperaturax. Spravochnik. Moscow: Metallurgiya, 1984. 200 p. (In Russ.)

26. Свойства элементов. Справочник. М.Е. Дриц (ред.). М.: Metallurgiya, 1985. 672 с.

Svojstva e'lementov. Spravochnik. M.E. Dricz (red.). Moscow: Metallurgiya, 1985. 672 p. (In Russ.)

27. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 292 с.

Novikova S.I. Teplovoe rasshirenie tverdyy'x tel. Moscow: Nauka, 1974. 292 p. (In Russ.)

28. Терехов С.В. Термодинамическая модель размытого фазового перехода в металлическом стекле Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆. Физика и техника высоких давлений. 2018; 28(1): 54—61.

Terexov S.V. Termodinamicheskaya model' razmy'togo fazovogo perexoda v metallicheskom stekle Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆. Fizika i texnika

vy'sokix davlenij. 2018; 28(1): 54—61. (In Russ.)

29. Терехов С.В. Тепловые свойства вещества в рамках модели двухфазной системы. *Физика твердого тела*. 2022; 64(8): 1077—1083. doi:10.21883/FTT.2022.08.52710.352.

Terekhov S.V. Thermal properties of matter within the model of a two-phase system / *Physics of the Solid State*. 2022; 64(8): 1089—1095. (In Russ.) doi: 10.21883/PSS.2022.08.54631.352.

30. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970. 304 с.

Kubo R. Thermodynamics. Amsterdam: North-Holland, 1968. 300 p.

31. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 791 с.

Kittel Ch. Introduction to solid state physics (5th ed.). New York: Wiley, 1976. 673 p.

32. Терехов С.В. Расчет базисной линии теплоемкости вещества в модели двухфазной области при отсутствии фазовых и других переходов. *Неорганические материалы*. 2023; 59(4): 468—472. doi: 10.31857/S0002337X23040127.

Terekhov S.V. Calculation of the heat capacity baseline in a model of a two-phase region in the absence of phase transformations and other transitions. *Inorganic Materials*. 2023; 59(4): 452—456. (In Russ.) doi:10.1134/S002016852304012X.

33. Терехов С.В. Теплоемкости и коэффициенты теплового расширения металлов триады железа. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023; 25(3): 406—414. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11265>.

Terekhov S.V. Heat capacities and thermal expansion coefficients of iron triad metals. *Condensed Matter and Interphases*. 2023; 25(3): 406—414. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11265>.

34. Терехов С.В. Теплофизические свойства металлов в квазидвухфазной модели. *Физика металлов и металловедение*. 2023; 124(12): 1261—1270. doi:10.31857/S0015323023601666.

Terekhov S.V. Thermophysical properties

of metals in quasi two-phase model. *Physics of Metals and Metallography*. 2023; 124(12): 1291—1300. (In Russ.) doi:10.1134/S0031918X23602196.

35. Терехов С.В. Особенности на графиках тепловых характеристик металлов при отсутствии и наличии фазовых переходов. *Физика твердого тела*. 2024; 66(7): 1144—1149. doi:10.61011/FTT.2024.07.58386.396.

Terekhov S.V. Features on the graphs of thermal characteristics of metals in the absence and presence of phase transitions // *Physics of the Solid State*. 2024; 66(7): 1104-1109. (In Russ.) doi:10.61011/PSS.2024.07.58983.396.

36. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. С. 26.

Epifanov G.I. Fizika tverdogo tela. Moscow: Vy'sshaya shkola, 1977. P. 26.

37. Ягодин Д.А. Исследование структурной неоднородности расплавов Ga-Bi и Pd-Si методами акустометрии и гамма-денситометрии. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет, 2007. 23 с.

Yagodin D.A. Issledovanie strukturnoj neodnorodnosti rasplavov Ga-Bi i Pd-Si metodami akustometrii i gamma-densitometrii. Avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet, 2007. 23 p. (In Russ.)

38. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник под ред. Н.А. Силина. М.: НПО «Информация и технико-экономические исследования», 1992. 184 с.

Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya., Malinin L.A., Czalkov V.N. Teplofizicheskie svoystva komponentov goryuchix system. Spravochnik pod red. N.A. Silina. M.: NPO «Informaciya i texniko-e'konomicheskie issledovaniya», 1992. 184 p. (In Russ.)

39. Терехов С.В. Прогнозирование теплофизических свойств аморфных сплавов никеля Ni₂B, Ni₄₄Nb₅₆, Ni₆₂Nb₃₈ по данным о

компонентах. *Расплавы*. 2024; 4: 351—364. doi:10.31857/S0235 010624040011.

Terexov S.V. Prognozirovanie teplofizicheskikh svoystv amorfny`x splavov nikelya Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>44</sub>Nb<sub>56</sub>, Ni<sub>62</sub>Nb<sub>38</sub> po dannu`m o komponentax. *Rasplavy`*. 2024; 4: 351—364. (In Russ.)

40. Никитин В.И., Никитин К.В. Развитие и применение явления структурной наследственности в алюминиевых сплавах. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2014; 7(4): 424—429. <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13236>.

Nikitin V.I., Nikitin K.V. Razvitie i primeneniye yavleniya strukturnoy nasledstvennosti v

alyuminiyevy`x splavax. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tehnologii*. 2014; 7(4): 424—429. (In Russ.) <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13236>.

41. Попель П.С., Сидоров В.Е., Бродова И.Г., Кальво-Дальборг М., Дальборг У. Влияние термической обработки исходного расплава на структуру и свойства кристаллических слитков и отливок. *Расплавы*. 2020; 1: 3—36.

Popel` P.S., Sidorov V.E., Brodova I.G., Kal`vo-Dal`borg M., Dal`borg U. Vliyanie termicheskoy obrabotki isходного raspлава na strukturu i svoystva kristallicheskix slitkov i otlivok. *Rasplavy`*. 2020; 1: 3—36. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the author

Терехов Сергей Владимирович — доктор физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела электронных свойств металлов, Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, ул. Розы Люксембург, 72, Донецк, 283048, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3037-7258>; e-mail: svlter@yandex.ru

Sergey V. Terekhov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Researcher of the Department of Electronic Properties of Metals, A.A. Galkin Donetsk Institute of Physics and Technology, 72 Roza Luxemburg str., Donetsk, 283048, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3037-7258>; e-mail: svlter@yandex.ru

