

О ТЕПЛОЕМОСТИ КАРБИДА ТИТАНА TiC_x *

И. Хидиров, В.В. Гетманский, А.С. Парпиев, Ш.А. Махмудов

Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан
 пос. Улугбек, 100214, Ташкент
 тел.: (998-71) 289-31-18; e-mail: khidirovi@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.056-066

Заключение совета рецензентов: 05.12.18 Заключение совета экспертов: 10.12.18 Принято к публикации: 14.12.18

Работа относится к области исследования теплофизических параметров тугоплавких сплавов внедрения, которые широко используются в технике и промышленности, в частности для конструкционных узлов альтернативной энергетики. Впервые рассчитана изохорная теплоемкость кубического карбида титана TiC_x в дебаевском приближении в интервале концентрации углерода $x = 0,97-0,70$ при комнатной температуре (300 К) и температуре жидкого азота (80 К) через температуру Дебая, установленную на основе данных нейтроноструктурного анализа. Определено, что при комнатной температуре с уменьшением концентрации углерода теплоемкость существенно увеличивается – с 29,40 Дж/мол·К до 34,20 Дж/мол·К, а при температуре $T = 80$ К – с 3,08 Дж/мол·К до 8,20 Дж/мол·К. Проанализированы литературные данные и приведены результаты оценки высокотемпературной зависимости теплоемкости C_V кубического карбида титана $TiC_{0,97}$, проведенной на основе данных нейтроноструктурного анализа. Предложено внести правку в формулу Неймана – Коппа в дебаевском приближении для описания высокотемпературной зависимости теплоемкости карбида титана TiC . После внесения поправки, формула Неймана – Коппа хорошо описывает результаты известных экспериментов по высокотемпературной зависимости теплоемкости карбида титана TiC_x . В предложенной формуле учитывается степень термического возбуждения (квантовое число), увеличивающаяся скачками с повышением температуры.

Результаты позволяют прогнозировать термодинамические характеристики карбида титана в интервале температур 300–3 000 К и могут быть использованы в методах расчета параметров функциональных материалов альтернативной энергетики.

Ключевые слова: карбид титана; теплоемкость; дебаевское приближение; температура Дебая; криогенная температура; высокая температура; степень теплового возбуждения; тантал.

ABOUT HEAT CAPACITY OF TITANIUM CARBIDE TiC_x

I. Khidirov, V.V. Getmanskiy, A.S. Parpiev, Sh.A. Makhmudov

Institute of Nuclear Physics, Uzbekistan Academy of Sciences
 Tashkent, 100214, Uzbekistan
 tel.: (998-71) 289 31 18, e-mail: khidirovi@yandex.ru

oi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.056-066

Referred 5 December 2018 Received in revised form 10 December 2018 Accepted 14 December 2018

This work relates to the field of thermophysical parameters of refractory interstitial alloys. The isochoric heat capacity of cubic titanium carbide TiC_x has been calculated within the Debye approximation in the carbon concentration

*Хидиров И., Гетманский В.В., Парпиев А.С., Махмудов Ш.А. О теплоемкости карбида титана TiC_x // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;01-03:56-66.

range $x = 0.70\text{--}0.97$ at room temperature (300 K) and at liquid nitrogen temperature (80 K) through the Debye temperature established on the basis of neutron diffraction analysis data. It has been found out that at room temperature with decrease of carbon concentration the heat capacity significantly increases from 29.40 J/mol·K to 34.20 J/mol·K, and at $T = 80$ K – from 3.08 J/mol·K to 8.20 J/mol·K. The work analyzes the literature data and gives the results of the evaluation of the high-temperature dependence of the heat capacity C_V of the cubic titanium carbide $TiC_{0.97}$ based on the data of neutron structural analysis. It has been proposed to amend in the Neumann–Kopp formula to describe the high-temperature dependence of the titanium carbide heat capacity. After the amendment, the Neumann–Kopp formula describes the results of well-known experiments on the high-temperature dependence of the heat capacity of the titanium carbide TiC_x . The proposed formula takes into account the degree of thermal excitation (a quantized number) that increases in steps with increasing temperature.

The results allow us to predict the thermodynamic characteristics of titanium carbide in the temperature range of 300–3000 K and can be useful for materials scientists.

Keywords: titanium carbide; heat capacity; Debye approximation; Debye temperature; cryogenic temperature; high temperature; degree of thermal excitation; tantalum.



Ирисали Хидиров
Irisaly Khidirov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией структурных превращений в твердых телах Института ядерной физики АН РУ.

Образование: Ташкентский государственный педагогический университет им. Низами (1969 г.).

Область научных интересов: водородное материаловедение и водородная энергетика; аккумулярование водорода в кристаллах; структурные фазовые превращения в сплавах внедрения (в карбидах, нитридах и гидридах металлов).

Публикации: более 200, в том числе 3 монографии, 4 патента.

h -index по Scopus: 3; по Research Gate: 4.

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, head of the laboratory of the Structural Transformations in Solids States, the Institute of Nuclear Physics of Academy of Sciences of Uzbekistan.

Education: Tashkent State Pedagogical University, 1969.

Research interests: hydrogen materials science and hydrogen energy; storage of hydrogen in crystals; structural phase transitions in interstitial alloys (carbides, nitrides, hydrides of metals).

Publications: more than 200, including 3 monograph, 4 patents.



Вячеслав Васильевич
Гетманский
Vyacheslav Getmanskiy

Сведения об авторе: старший научный сотрудник, Институт ядерной физики АН РУ.

Образование: Ташкентский электротехнический институт связи (1982 г.).

Область научных интересов: разработка электронных узлов нейтронного дифрактометра; автоматизация и программное обеспечение работы дифрактометра; фазовые превращения в сплавах внедрения.

Публикации: более 20.

Information about the author: Senior Researcher at the Institute of Nuclear Physics of Academy of Sciences of Uzbekistan.

Education: Tashkent Electrotechnical Institute of Communication, 1982.

Research interests: development of electronic nodes of neutron diffractometer; automation and software work of diffractometer; phase transformations in alloys of introduction.

Publications: more than 20.



Адхамжон
Собиржанович Парпиев
Adkhamjon Parpiev

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, Институт ядерной физики АН РУ.

Образование: Национальный университет Узбекистана (2008 г.).

Область научных интересов: порошковая нейтронная дифракция; структура и свойства нестехиометрических соединений.

Публикации: более 20.
 h -index по Scopus: 1; по Research Gate: 1.

Information about the author: Junior Researcher at Institute of Nuclear Physics of Academy of Sciences of Uzbekistan.

Education: The National University of Uzbekistan, 2008.

Research interests: neutron powder diffraction; the structure and properties of nonstoichiometric compounds.

Publications: more than 20.





Шерзод Ахмадович
Махмудов
Sherzod Mahmudov

Сведения об авторе: старший научный сотрудник, Институт ядерной физики АН РУ.

Образование: Национальный университет Узбекистана (2001 г.).

Область научных интересов: микроэлектроника; свойства твердых тел и наноструктуры.

Публикации: более 25.
h-index по Scopus: 1.

Information about the author: Senior Researcher at Institute of Nuclear Physics of Academy of Sciences of Uzbekistan.

Education: The National University of Uzbekistan, 2001.

Research interests: microelectronics; properties of solids and nanostructures.

Publications: more than 25.

1. Введение

Благодаря таким свойствам, как тугоплавкость, высокая прочность и коррозионная стойкость в агрессивных средах, карбид титана переменного состава TiC_x со структурой типа NaCl (пространственная группа – пр. гр. $Fm\bar{3}1$) широко применяется в современной технике, промышленности [1] и медицине [2]. Сверхтвердые композиционные материалы на основе TiC_x используются в качестве функциональных материалов альтернативной энергетики. В частности, покрытия из карбида титана TiC_x имеют очень высокую температуру плавления и термостойкость, высокую твердость и отличную износостойкость, низкий коэффициент трения, высокую электропроводность и теплопроводность и могут быть использованы в качестве износостойких покрытий для термобарьерного покрытия в термоядерных реакторах [3]. В связи с практическим значением

карбида титана TiC_x важно изучать его свойства и влияние структурных вакансий на эти свойства, например на теплоемкость C_V . Однако до сих пор теплоемкость карбида титана TiC_x определялась термодинамическими методами, которые изучают свойства реальных систем без рассмотрения составляющих их частиц и взаимодействий между ними, в то время как изучение теплоемкости по данным дифракции в кристаллической структуре TiC_x даёт более полную картину, позволяет определять макроскопические свойства материала через его тонкую структуру. Целью данной работы является расчет теплоемкости (C_V) карбида титана TiC_x для ряда составов в дебаевском приближении при комнатной ($T = 300$ К) и криогенной ($T = 80$ К) температурах, а также в диапазоне от комнатной до приблизительно температуры плавления $T = 3\ 000$ К через температуру Дебая θ , найденную на основе данных нейтроноструктурного анализа.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α_L	Коэффициент теплового линейного расширения
ϵ	Энергия фонона, или квантового осциллятора
$\Phi(x)$	Табулированная функция Дебая
θ	Температура Дебая
θ_E	Температура Эйнштейна
ω	Циклическая частота тепловых колебаний атомов в решетке
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
C	Теплоемкость
F	Обозначение сингонии кристалла
G	Коэффициент Грюнейзена
h	Постоянная Планка
k	Постоянная Больцмана
m	Плоскость симметрии
m	Средняя масса атомов углерода и титана в карбиде титана TiC_x
N_A	Число Авогадро
n	Количество атомов в химической формуле сплава
n_s	Степень термического возбуждения кристалла
R	Универсальная газовая постоянная
T	Температура, К
\bar{u}^2	Полное среднеквадратичное смещение атомов, Å^2
W	Тепловой фактор, Å^2
x	Концентрация углерода в карбиде титана TiC_x
x	Отношение температуры Дебая к измеряемой температуре: $x = \theta/T$

Индексы нижние	
<i>d</i>	Динамическое
<i>P</i>	При постоянном объеме
<i>s</i>	Статическое
<i>V</i>	При постоянном давлении

2. Теоретический анализ

Температуру Дебая θ можно определить различными методами: путем измерения упругих постоянных, низкотемпературной теплоемкости, молекулярной теплоемкости, температуры плавления, интенсивностей дифракционных отражений рентгеновских лучей [4] и нейтронодифракционных максимумов [5]. У каждого метода есть свои недостатки и преимущества. Например, при определении температуры Дебая из низкотемпературной теплоемкости θ_{C_p} , C_p пользуются длинноволновым участком фононного спектра. При этом способе сложно проводить точные измерения, поскольку решеточный вклад в теплоемкость при низких температурах очень мал. Кроме того, в таких сверхпроводниках, как карбид титана электронная составляющая теплоемкости претерпевает скачок при низких температурах, что существенно затрудняет точное определение θ_{C_p} [6]. Измерение упругих постоянных также затруднительно ввиду высокой прочности и большой хрупкости карбида титана, при этом можно допустить серьезные ошибки при измерении отпечатка индентора из-за трещинообразования при вдавливании.

Температуру Дебая можно определить на основе анализа теплового фактора дифракционных отражений нейтронов. Амплитуда рассеяния нейтронов не зависит от угла отражения, а влияние экстинкции, преимущественной ориентации и поглощения незначительны. В связи с этим авторы данной статьи считают, что теплоемкость карбида титана, которая рассчитывается с помощью температуры Дебая, определенной на основе данных нейтронной дифракции, будет более достоверна и точна. Отметим, что авторы [7] также придерживаются точки зрения, что температура Дебая, определенная по тепловому фактору ослабления нейтронодифракционных максимумов имеет большую достоверность и надежность. Температура Дебая связана со среднеквадратичным смещением атомов $\overline{u^2}$, определяющим тепловой фактор W ослабления интенсивности дифракционных максимумов от кристаллической решетки [4, 5]:

$$W = 8\pi^2 \overline{u^2} / 3, \quad (1)$$

где $\overline{u^2}$ – полное среднеквадратичное смещение атомных комплексов в сплавах, состоящее из суммы среднеквадратичной амплитуды тепловых колебаний (динамических) $\overline{u_d^2}$ и среднеквадратичного статического смещения $\overline{u_s^2}$ атомов решетки: $\overline{u^2} = \overline{u_d^2} + \overline{u_s^2}$. Если удастся разделить статическое смещение и среднеквадратичную амплитуду тепловых колебаний атомов, то, согласно [4], через последнюю можно определить и температуру Дебая θ :

$$\theta = \frac{9h^2}{4\pi^2 km \overline{u_d^2}} \times \left[\frac{\Phi}{x} + 1/4 \right], \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; m – средняя масса атомного комплекса для сплавов внедрения, $\Phi(x)$ – табулированная функция Дебая; $x = \theta/T$ – отношение температуры Дебая к измеряемой температуре; T – температура в градусах Кельвина, при которой производятся измерения. Такая работа проделана в [8], где была установлена температура Дебая карбида титана TiC_x для ряда составов при двух значениях температуры: $T_1 = 300$ К и $T_2 = 80$ К, – на основе значения $\overline{u_d^2}$, определенного по данным дифракции нейтронов.

3. Результаты и их обсуждение

Определение температуры Дебая, описывающей фундаментальные свойства твердого тела, является актуальной задачей физики твердого тела. Прежде чем приступить к расчету теплоемкости карбида титана через температуру Дебая θ , определенную на основе нейтроноструктурного анализа, сравним значения температуры Дебая карбида титана, полученные различными методами (табл. 1). В табл. 1 значения температуры Дебая значительно, до 62 %, отличаются (колонки II [6] и V [10] табл. 1) друг от друга. Как показывает анализ табл. 1, предпочтение следует отдавать значению, определенному методом нейтронографии, потому что, во-первых, как уже было сказано, данный метод обладает рядом преимуществ; во-вторых, эти данные согласуются с данными ряда авторов (в колонках II [10] и III [11] табл. 1) и совпадают со средним значением данных всех авторов с разницей всего 1,7 % (колонки I и VI табл. 1).



Таблица 1

Значения температуры Дебая θ (К) для стехиометрического карбида титана, полученные различными методами

Table 1

The values of the Debye temperature θ (K) for stoichiometric titanium carbide obtained by various methods

Дифракция нейтронов	По теплоемкости	По модулю упругости	Рентгено-графически	Теоретическая оценка	Среднее значение по всем пунктам
I	II	III	IV	V	VI
860 [8]	614 [6], 676 [9], 845 [10]	940 [10], 890 [11]	740 [12]	934 [10], 995 [10]	845

Из теории теплоемкости Дебая вытекает [13, 14], что для однокомпонентных кристаллов в интервале температур

$$0,10 < T/\theta \leq 0,50 \quad (3)$$

между температурой Дебая θ и теплоемкостью C_V имеется следующая связь:

$$C_V = 3R \left(1 - \frac{1}{20} \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \right), \quad (4)$$

где R – универсальная газовая постоянная. При высокой температуре это уравнение приводит к значениям теплоемкости, близким к $C_V = 3R$, соответствующей закону Дюлонга – Пти. В табл. 2 приведено соотношение T/θ для исследуемых составов карбида титана при комнатной температуре ($T_1 = 300$ К). Как видно из табл. 2, для исследуемых составов карбида титана при комнатной температуре выполняется условие (3).

Таблица 2

Температура Дебая θ , соотношение T/θ и теплоемкость для исследуемых образцов при $T_1 = 300$ К

Table 2

Debye temperature θ , ratio T/θ and heat capacity for investigated samples at $T_1 = 300$ К

№	Образец	θ , К [8]	T_1/θ	C_{V_1} , Дж/моль·К
1	TiC _{0,97}	860	0,35	29,04
2	TiC _{0,88}	700	0,42	34,12
3	TiC _{0,70}	590	0,51	34,20

Поскольку карбид титана TiC_x является двухкомпонентным, для вычисления его теплоемкости следует использовать правило Неймана – Коппа [13, 14]. Согласно этому правилу, молярная теплоемкость соединений складывается аддитивно из атомных теплоемкостей их компонентов. С учетом формулы (4), для карбида титана TiC_x при высоких температурах формула Неймана – Коппа выглядит следующим образом:

$$C_V = 3(1+x)R \left(1 - \frac{1}{20} \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где $(1+x) = n$ – общее число атомов в химической формуле сплава. Полученные результаты вычисления теплоемкости карбидов титана по формуле (5) также приведены в табл. 2. Для стехиометрического карбида титана TiC многие авторы [9, 15–17] дают значения теплоемкости при постоянном давлении C_P в интервале 33,66 ÷ 34,06 Дж/моль·К, в среднем, $C_P = 33,86$ Дж/моль·К. Наши расчеты по формуле (5) дают для карбида титана TiC_{0,97} значение $C_V = 29,40$ Дж/моль·К, в среднем меньше на 13 %. Экспериментально измеряемая величина, приведенная в [9, 15–17], является изобарной теплоемкостью C_P . Поскольку мы рассчитывали изохорную теплоемкость C_V в дебаевском приближении, разность ΔC оценивали по известной формуле [13]: $(C_P - C_V) = 3G\alpha_L T$, где G – коэффициент Грюнейзена; α_L – коэффициент теплового линейного расширения. Известно, что для кубического карбида титана в области гомогенности α_L является весьма маленькой величиной: $\alpha_L = (7,72 \div 8,58) \cdot 10^{-6}$ 1/К [17]. Согласно [10], α_L слабо меняется до температуры плавления, а коэффициент $G = 1,7$. Как показывают расчеты, при $T = 300$ К разность $C_P - C_V$ составляет $\Delta C = 0,012$ Дж/моль·К, а при $T = 3000$ К – $\Delta C = 0,12$ Дж/моль·К. Отсюда видно, что ΔC – очень маленькая величина и остается таковой до температуры плавления карбида титана. Поэтому можно допустить, что $C_V \approx C_P$. Анализ табл. 2 показывает, что с уменьшением концентрации углерода (с увеличением концентрации структурных вакансий в углеродной подрешетке) в интервале $x = 0,97 \div 0,70$ теплоемкость карбида титана TiC_x увеличивается (на 16 %). Такая зависимость вытекает из уравнения (5), согласно которому с уменьшением концентрации второго компонента теплоемкость должна уменьшаться. Однако, согласно той же формуле (5), теплоемкость также зависит от отношения θ/T , уменьшение которого (из-за снижения температуры Дебая в результате уменьшения жесткости решетки с увеличением количества структурных вакансий) при постоянной $T = 300$ К приводит к значительному росту числового значения выражения в скобках



формулы (5). Как показывают расчеты, вклад от этого выражения в теплоемкость является более весомым, чем вклад от концентрации x . Такая пропорция обуславливает увеличение теплоемкости при снижении концентрации углерода (при повышении концентрации структурных вакансий). Разумеется, рост концентрации структурных вакансий в карбиде титана TiC_x является причиной трудностей, возникающих при распространении тепловой энергии в кристаллической решетке, что приводит к увеличению теплоемкости. Обращает на себя внимание тот факт, что со снижением концентрации углерода при $x = 0,88$ теплоемкость карбида титана TiC_x увеличивается значительно (на 16 %), а при дальнейшем снижении концентрации углерода остается практически постоянной (табл. 2).

Авторы данной статьи также определили теплоемкость C_V при температуре $T = 80$ К с помощью

формулы Неймана – Коппа, вытекающей из теории теплоемкости для TiC_x при низких температурах $T/\theta \leq 0,10$ [14]:

$$C_V = (1+x) \cdot 233,8R \left(\frac{T}{\theta(80K)} \right)^3. \quad (6)$$

Результаты расчета приведены в табл. 3. Концентрационная зависимость теплоемкости при $T = 80$ К имеет такую же тенденцию, какая наблюдается при $T = 300$ К, а именно: с увеличением количества структурных вакансий в углеродной подрешетке теплоемкость растёт. Следует отметить, что наблюдается резкое уменьшение теплоемкости при температуре $T = 80$ К (табл. 3) по сравнению с теплоемкостью при $T = 300$ К (в среднем на ≈ 83 %).

Таблица 3
Temperature Deбая θ , отношение T/θ и теплоемкость для исследуемых образцов при $T_2 = 80$ К
Table 3
Debay temperature θ , ratio T/θ and heat capacity for samples investigated at $T_2 = 80$ К

№	Образец	θ , К [8]	T_2/θ	C_{V_2} , Дж/моль·К	$\Delta C_V = C_{V_1} - C_{V_2}$, Дж/моль·К	$\Delta C_V / C_{V_1}$, %
1	TiC _{0,97}	520	0,0930	3,08	25,87	89,36
2	TiC _{0,88}	480	0,1143	5,50	28,62	83,90
3	TiC _{0,70}	440	0,1356	8,20	26,00	76,02

Далее рассмотрим температурную зависимость теплоемкости карбида титана при высоких значениях температуры. В работе [9] для установления высокотемпературной зависимости C_P использованы расчетные данные, выведенные для карбида титана TiC на основе теории теплоемкости Дебая рядом авторов. В работе [16] эти данные были сопоставлены с результатами нескольких прямых измерений, проведенных с помощью метода импульсного нагрева, и составлена таблица температурной зависимости C_P в интервале температур $300 \div 3000$ К. Эти данные приведены в виде графика на рис. 1 (кривая *a*).

Сначала по формуле Неймана – Коппа (5) рассчитаем C_V в интервале температур $T = 300 \div 3000$ К. Поскольку карбид титана имеет гранцентрированную кубическую (простую) структуру, для теплоемкости TiC должна хорошо работать формула Неймана – Коппа в дебаевском приближении. Однако, как видно на рис. 1 (кривая *b*), для высокотемпературной теплоемкости карбида титана дебаевское приближение более или менее правильно работает только в интервале температур $T = 300 \div 1400$ К с расхождением в среднем ≈ 8 %. При дальнейшем повышении температуры это расхождение растет, и особенно быстро с 1600 К. Затем, начиная с 2300 К, расхождение составляет более 20 %, при 3000 К – 34 %.

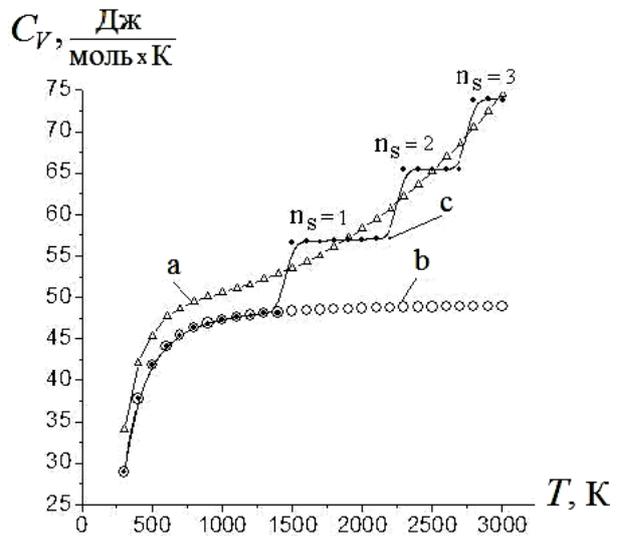


Рис. 1 – Температурная зависимость теплоемкости карбида титана TiC_{0,97}: *a* – по справочным данным [16]; *b* – по данным, рассчитанным в дебаевском приближении по формуле (5); *c* – по данным, рассчитанным по формуле (7) через температуру Дебая, приведенную в [8] (табл. 3)

Fig. 1 – Temperature dependence of the heat capacity of the titanium carbide TiC_{0,97}: *a* – according to reference data [16]; *b* – according to data calculated in Debye approximation by the formula (5); *c* – according to the data calculated by the formula (7) through the Debye temperature given in [8] (tabl. 3)

Таким образом, дебаевское приближение для высокотемпературной теплоемкости с ростом температуры неудовлетворительно объясняет экспериментальные данные, начиная с условия $T/\theta \approx 1,74$ ($T \approx 1\ 500$ К). Следует отметить, что в некоторых работах [18–22] для ряда различных соединений также было установлено, что модель Дебая не описывает экспериментальные значения C_p при высоких температурах. При этом наблюдается существенно завышенное значение экспериментально установленной теплоемкости. В работах [19, 21] такое несовпадение объясняют возбуждением оптических мод колебаний решетки с ростом температуры, и избыточную теплоемкость определяют выражением:

$$\Delta C_p = R \frac{\theta_E}{T} \exp\left(-\frac{\theta_E}{T}\right),$$

где θ_E – характеристическая температура Эйнштейна. При этом при вычислении функции Эйнштейна берут весьма завышенное значение этой температуры, соответствующей оптической высокой частоте. Например, в [21] для соединения $Y_2Cu_2O_5$ значение θ_E принимали равным 4 050 К. Таким же способом объяснить высокотемпературную зависимость теплоемкости

карбида титана невозможно, поскольку значение θ_E часто не известно. Кроме того, необходимо обратить внимание на то, что согласно некоторой учебной литературе (например [13, 14]) температура θ_E – та, при которой начинается быстрый спад в температурной зависимости теплоемкости C_V по закону куба ($C_V = f(T^3)$) в интервале температур 3 000 К. Следовательно, на наш взгляд, в отличие от температуры Дебая θ однозначно понять физический смысл температуры θ_E довольно трудно. В связи с этим было интересно выяснить, как работает дебаевское приближение для высокотемпературной зависимости теплоемкости одноатомного кристалла с простой кубической структурой, для которой оптическая ветвь колебания отсутствует [13, 14]. Для этой цели также в дебаевском приближении рассчитывалась высокотемпературная зависимость теплоемкости тантала (Ta) через его температуру Дебая θ : $Ta = 225$ К [23] по формуле (5). Тантал имеет объемноцентрированную кубическую (простую) структуру и высокую температуру плавления ($T_{пл.} = 3\ 290$ К [23]). На рис. 2 представлена температурная зависимость теплоемкости Ta от комнатной температуры до температуры плавления (кривая *a*), заимствованная из работы [16].

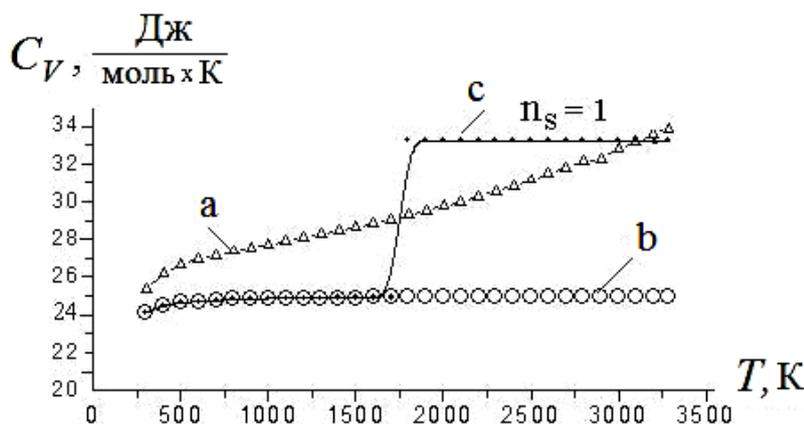


Рис. 2 – Температурная зависимость теплоемкости тантала (Ta): *a* – по данным [16]; *b* – по данным, рассчитанным в дебаевском приближении по формуле (5); *c* – по данным, рассчитанным по формуле (7) для одноатомного кристалла

Fig. 2 – Temperature dependence of the heat capacity of the tantalum (Ta): *a* – according to data [16], *b* – according to data calculated in the Debye approximation; *c* – according to data calculated by formula (9) for a monatomic crystal

Как видно на рис. 2 (кривая *b*), температурная зависимость теплоемкости Ta , рассчитанная в дебаевском приближении, начиная уже с $400 \div 500$ К проходит существенно ниже, чем экспериментально установленная в [16] (рис. 2, кривая *a*). При дальнейшем повышении температуры это расхождение увеличивается, доходя до 26 % вблизи температуры плавления. Таким образом, существенное расхождение между экспериментально наблюдаемой и рассчитанной в дебаевском приближении высокотемпературными зависимостями теплоемкостей наблюдается также в простой кристаллической решетке, состоящей из атомов одного сорта. Наблюдаемые расхождения, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Общеизвестным фактом является то, что при низких и умеренных температурах в кристалле возникают гар-

монические колебания, соответствующие трем степеням свободы поступательного движения атомов. Однако повышение температуры приводит к увеличению амплитуды колебания атомов как в одноатомной решетке, так и в решетке со сложным базисным элементом. В результате происходит фон-фонное рассеяние с рождением новых частот, превышающих частоты Дебая, так как при этом становится возможной передача энергии от колебаний одной частоты к колебаниям другой частоты [24]. Поскольку по высокотемпературной зависимости C_V наблюдаются аналогичные результаты как для двухатомной решетки карбида титана TiC_x , так и для одноатомной решетки Ta , можно предположить, что частоты фонон-фонного рассеяния могут быть как акустическими, так и оптическими модами. Согласно

теории Дебая, в области высоких температур энергия решетки растет пропорционально температуре [13]. Для одного моля кристалла $E_p = 3N_A kT = 3RT$. Отсюда следует, что при высоких температурах C_V должна остаться постоянной. Однако, как показывают эксперименты, при температурах $T > \theta$ C_V растет нелинейно (рис. 1 и 2). По-видимому, решетка при высоких температурах $T \geq \theta$, как и при низких температурах, согласно принципу квантовой механики, может принимать только кратные значения энергии $\varepsilon_s = n_s h\nu_s = n_s RT$, не зависящей от деталей кристаллической структуры, где n_s – степень термического возбуждения кристалла, ответственная за фонон-фононное рассеяние. Степень термического возбуждения кристалла принимает дискретные значения $n_s = 1, 2, 3, \dots$, соответствующие определенным температурам. Причем этот принцип квантования действует до температуры плавления. Исходя из этого, формулу (5) для высокотемпературной теплоемкости для одного моля вещества предлагается записать в следующем виде:

$$C_V = 3 + x R \left(1 - \frac{1}{20} \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \right) + n_s R. \quad (7)$$

В более общем виде формулу (7) для соединения с количеством n атомов в его химической формуле запишем следующим образом:

$$C_V = 3nR \left(1 - \frac{1}{20} \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \right) + n_s R. \quad (8)$$

Если рассчитать теплоемкость по формуле (7), то наблюдается существенное уменьшение расхождения между ранее установленными данными температурной зависимости теплоемкости (рис. 1, кривая *c*). По-видимому, в карбиде титана уже при температуре ~ 500 К небольшое количество атомов имеет степень термического возбуждения $n_s = 1$, и количество этих атомов постепенно растет до температуры 1 780 К, пока большинство атомов не приобретет степень возбуждения $n_s = 1$. Судя по рис. 1, при температуре 1 780 К количество термически возбужденных атомов со степенью возбуждения $n_s = 1$ достигает максимального значения. Затем при повышении температуры один за другим постепенно возбуждаются атомы с $n_s = 2$ и так далее. Таким образом, в интервале температур 500 ÷ 1 780 К $n_s = 1$, в интервале 2 300 ÷ 2 700 К все атомы кристалла постепенно приобретают термическое возбуждение $n_s = 2$, а в интервале температур 2 800 ÷ 3 000 К – $n_s = 3$ (см. рис. 1, кривая *b*).

Данные предположения позволяют во всем интервале температур 1 400 ÷ 3 000 К получить хорошее согласие между значениями, известными в [16] и полученными по формуле (7). Отметим, что при этом во всем температурном интервале расхождение ΔC_V составляет в среднем 2,7 Дж/моль·К ($\sim 5\%$, см. рис. 1).

Принципиальное различие между формулой Неймана – Коппа (5) в дебаевском приближении и формулой (7) или (8), предложенными авторами настоящей статьи, заключается в том, что в формулах (7) или (8) при температурах $T > \theta$ через каждый определенный температурный интервал добавляется величина R (для энергии одного моля RT), умноженная на степень теплового возбуждения n_s , независимо от деталей кристаллической структуры из-за фонон-фононного рассеяния. В результате при различных интервалах температуры изменение теплоемкости должно иметь ступенчатый характер, соответствующий различному числу степени теплового возбуждения кристалла. При каждом увеличении n_s на единицу должен наблюдаться резкий скачок теплоемкости, рассчитанной по формуле (7). Как видно на графиках (см. рис. 1 и 2), экспериментально наблюдаемая высокотемпературная зависимость теплоемкости не имеет ступенчатого характера, а является гладкой кривой. Дело в том, что рост экспериментально наблюдаемой теплоемкости отстает от роста теплоемкости, определенной по формуле (7). Причем эта закономерность наблюдается как для карбида титана (см. рис. 1), так и для Та (см. рис. 2). По-видимому, это можно объяснить тем, что, согласно [25], при определенной температуре все атомы кристалла не сразу, а постепенно переходят на соответствующую степень термического возбуждения. Следует отметить, что чем выше температура, тем быстрее наступает термодинамическое равновесное состояние, соответствующее определенному термическому возбужденному состоянию фононов по всему кристаллу (уменьшается длина отрезка линии, соответствующая определенному возбужденному состоянию). Кроме того, ступенчатый характер температурной зависимости удельной теплоемкости стекла $(As_2S_3)_{0,50}(As_2Sc_{13})_{0,50}$ имеет явно ступенчатый характер в интервале 100 ÷ 500 К [26]. Равновесие теплового возбуждения фононов в стекле наступает гораздо быстрее по сравнению с кристаллами.

4. Заключение

При комнатной температуре изохорная теплоемкость карбида титана TiC_x с уменьшением концентрации углерода в интервале $x = 0,70 \div 0,97$ существенно увеличивается с 29,40 Дж/моль·К до 34 Дж/моль·К, а при температуре $T = 80$ К – с 3,08 до 8,20 Дж/моль·К. При температуре $T = 80$ К, по сравнению с комнатной температурой, наблюдалось существенное уменьшение теплоемкости (для всех исследуемых образцов в среднем на $\approx 88\%$).

Расчеты молярной изохорной теплоемкости C_V карбида титана TiC_{0,97} по формуле Неймана – Коппа в интервале температур 300 ÷ 3 000 К через температуру Дебая θ показали, что формула Неймана – Коппа в дебаевском приближении не описывает температурную зависимость теплоемкости карбида титана выше температуры $\sim 1 500$ К.



Эмпирическая формула, с помощью которой можно описывать экспериментально наблюдаемую высокотемпературную зависимость C_V карбида титана в интервале температур $300 \div 3\,000$ К, должна содержать член, состоящий из произведения R и степени возбуждения n_s , обусловленной фонон-фононным взаимодействием и не зависящей от деталей кристаллической структуры. При этом степень возбуждения n_s растет скачками на единицу через определенные интервалы температуры. Наличие данного члена, согласно принципу квантовой механики [13], обусловлено эффектом квантования внутренней энергии кристалла, которая при высоких температурах может измениться дискретно только на $\varepsilon_s = n_s \omega_s = n_s kT$ при определенном интервале температур вплоть до температуры плавления. Следовательно, внутренняя энергия и теплоемкость кристалла растут скачками с повышением температуры. Однако эксперименты показывают, что рост температурной зависимости теплоемкости отстает от роста степени теплового возбуждения из-за постепенного возбуждения атомов кристалла в определенном интервале температуры. Это определяет температурный рост экспериментально наблюдаемой теплоемкости по гладкой кривой. Аналогичный результат получен также для одноатомных кристаллов Та.

Список литературы

- [1] Жевтун, И.Г. Формирование износостойких композитных покрытий на титановых сплавах при электродуговой обработке в водных электролитах / И.Г. Жевтун, П.С. Гордиенко, С.Б. Ярусова. – М.: РИОР ИНФРА-М, 2018. – 155 с.
- [2] Байриков, И.М. Экспериментальная оценка биосовместимости нового СВС-материала на основе карбида титана со сквозной пористостью на культурах мезенхимальных стволовых клеток костного мозга человека / И. М. Байриков [и др.] // Вопросы челюстно-лицевой пластической хирургии, имплантологии и клинической стоматологии. – 2011. – № 1–2. – С. 23–27.
- [3] Yansheng, G. High-speed deposition of titanium carbide coatings by laser-assisted metal-organic CVD / G. Yansheng, Tu Rong, G. Takashi // Materials Research Bulletin. – 2013. – Vol. 48. – P. 2766–2770.
- [4] Иверенова, В.И. Теория рассеяния рентгеновских лучей / В.И. Иверенова, Г.П. Ревкевич. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – 246 с.
- [5] Нозик, Ю.З. Нейтроны и твердое тело: Структурная нейтронография, Т. 1. / Ю.З. Нозик, Р.П. Озеров, К.М. Хенниг. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
- [6] Тот, Л. Карбиды и нитриды переходных металлов / Л. Тот. – М.: Изд-во Мир, 1974. – 296 с.
- [7] Tsipenyuk, Yu.M. Zero point energy and zero point oscillations: how they are detected experimentally / Yu.M. Tsipenyuk // Uspekhi Fiziki. – 2012. – Vol. 55. – No. 8. – P. 855–867.
- [8] Хидиров, И. Раздельное определение динамических и статических среднеквадратичных смещений атомов карбида титана методом дифракции нейтронов / И. Хидиров, А.С. Парпиев // Кристаллография. – 2011. – Т. 56. – № 3. – С. 504–508.
- [9] Андриевский, А.Р. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе / А.Р. Андриевский, И.И. Спивак. – Челябинск: Изд-во Металлургия, 1989. – 368 с.
- [10] Андриевский, Р.А. Прочность тугоплавких соединений / А.Р. Андриевский, А.Г. Ланин, А.Г. Рымашевский. – М.: Металлургия, 1974. – 232 с.
- [11] Францевич, И.Н. Упругие постоянные и особенности электронного строения некоторых классов тугоплавких соединений, получаемых металло-керамическим путем / И.Н. Францевич [и др.] // Неорганические материалы. – 1967. – Т. 3. – № 1. – С. 8–16.
- [12] Houska, C.R.T. Thermal expansion and atomic vibration amplitudes for TiC, TiN, ZrC, ZrN and pure tungsten / C.R.T. Houska // J. Phys. and Chem. Solis. – 1964. – Vol. 25. – No. 4. – P. 359–366.
- [13] Kittel, Ch. Introduction to solid state physics. 8 th edition / Ch. Kittel. – 8 th edition. – New York: Wiley, 2005. – 704 p.
- [14] Шульце, Г. Металлофизика / Г. Шульце. – М.: Мир, 1971. – 503 с.
- [15] Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения / Г.В. Самсонов, И.М. Веницкий. – М.: Металлургия, 1976. – 580 с.
- [16] Стормс, Э. Тугоплавкие карбиды / Э. Стормс. – М.: Атомиздат, 1970. – 304 с.
- [17] Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1967. – 474 с.
- [18] Прекул, А.Ф. Высокотемпературная теплоемкость квазикристалла $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ / А.Ф. Прекул [и др.] // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – № 11. – С. 1933–1935.
- [19] Денисов, В.М. Высокотемпературная теплоемкость $Y_{2,9}No_{0,1}Al_5O_2$ / В.М. Денисов [и др.] // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55. – № 4. – С. 636–638.
- [20] Денисов, В.М. Высокотемпературная теплоемкость Du_2CuO_5 / В.М. Денисов [и др.] // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55. – № 9. – С. 1714–1716.
- [21] Денисова, Л.Т. Высокотемпературная теплоемкость YCu_2O_5 / Л.Т. Денисова [и др.] // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – № 5. – С. 888–891.
- [22] Денисова, Л.Т. Исследование теплоемкости $Lu_2Cu_2O_5$ / Л.Т. Денисова [и др.] // Физика твердого тела. – 2014. – Vol. 56. – № 3. – P. 620–622.
- [23] Кравец, С.Л. Большая Российская Энциклопедия / С.Л. Кравец, Ю.С. Осипов. – М.: БРЭ, 2007. – Т. 8. – 767 с.
- [24] Епифанов, Г.М. Физика твердого тела / Г.М. Епифанов. – 4-е изд., СПб.: Лань. – 2011. – 288 с.



[25] Гуртов, В.А. Физика твердого тела для инженеров / В.А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.

[26] Бурдянь, И.И. Теплопроводность и теплоемкость стекол состава (As₂S₃)_x(As₂Se₃)_{1-x} / И.И. Бурдянь, В.А. Баталин // Неорганические материалы. – 1995. – Т. 31. – № 1. – С. 127–128.

References

[1] Zhevtun I.G., Gordienko P.S., Yarusova S.B. Formation of wear-resistant composite coatings on titanium alloys during electric arc treatment in aqueous electrolytes (Formirovanie iznosostoikikh kompozitnykh pokrytii na titanovykh splavakh pri elektrodugovoi obrabotke v vodnykh elektrolitakh). Moscow: RIOR INFRA-M Publ., 2018; 155 p. (in Russ.).

[2] Bairikov I.M., Bayrikov I.M., Amosov A.P., Tyumina O.V., Volchkov S.E., Latukhin E.I., Scherbovskikh A.E., Smetanin K.S. Experimental evaluation of the biocompatibility of a new SHS-material based on titanium carbide with through porosity on cultures of mesenchymal stem cells bone marrow of human (Eksperimental'naya otsenka biosovmestimosti novogo SHS-materiala na osnove karbida titana so skvoznoi poristost'yu na kul'turakh mezenkhimal'nykh stvolovykh kletok kostnogo mozga cheloveka). *Voprosy chelyustno-litsevoi plasticheskoi khirurgii, implantologii i klinicheskoi stomatologii*, 2011;1–2:23–27 (in Russ.).

[3] Yansheng G., Rong Tu, Takashi G. High-speed deposition of titanium carbide coatings by laser-assisted metal–organic CVD. *Materials Research Bulletin*, 2013;48:2766–2770 (in Eng.).

[4] Iverenova V.I., Revkevich G.P. Theory of X-ray scattering (Teoriya rasseyaniya rentgenovskikh luchej). Moscow: MGU Publ., 1972; 246 p. (in Russ.).

[5] Nozik Yu.Z., Ozerov R.P., Khennig K.M. Neutrons and solid. Structural neutron diffraction. V. 1 (Neitrony i tverdoe telo: Strukturnaya neitronografiya T. 1). Moscow: Atomizdat Publ., 1979; 344 p. (in Russ.).

[6] Toth L. Carbides and nitrides of transition metals (Karbidy i nitridy perekhodnykh metallov). Moscow: Mir Publ., 1974; 296 p. (in Russ.).

[7] Tcipenyuk, Yu.M. Zero point energy and zero point oscillations: how they are detected experimentally. *Physics-USpekhs*, 2012;55(8):855–867 (in Eng.).

[8] Khidirov I., Parpiev A.S. Separate Determination of the Amplitude of Thermal Vibrations and Static Atomic Displacements in Titanium Carbide by Neutron Diffraction (Razdel'noe opredelenie dinamicheskikh i staticheskikh srednekvadraticnykh smeshchenii atomov karbida titana metodom difraktsii neitronov). *Kristallografiya*, 2011;56(3):504–508 (in Russ.).

[9] Andrievskii A.R., Spivak I.I. Strength of refractory compounds and materials based on them (Prochnost' tugoplavkikh soedinenii i materialov na ikh osnove). Chelyabinsk: Metallurgiya Publ., 1989; 368 p. (in Russ.).

[10] Andrievskii R.A., Lanin A.G., Rymashevskii A.G. Strength of refractory compounds (Prochnost'

tugoplavkikh soedinenii). Moscow: Metallurgiya Publ., 1974; 232 p. (in Russ.).

[11] Frantsevich I.N., Zhurakovskii E.A., Lyashchenko A.B. Elastic constants and features of the electronic structure of some classes of refractory compounds obtained by metal-ceramic (Uprugie postoyannye i osobennosti elektronnoogo stroeniya nekotorykh klassov tugoplavkikh soedinenii, poluchaemykh metallokeramicheskim putem). *Neorganicheskie materialy*, 1967;3(1):8–16 (in Russ.).

[12] Nouska C.R.T. Thermal expansion and atomic vibration amplitudes for TiC, TiN, ZrC, ZrN and pure tungsten. *J. Phys. and Chem. Solis*, 1964;25(4):359–366 (in Eng.).

[13] Kittel Ch. Introduction to solid state physics. 8 th edition. 8 th edition. New York: Wiley Publ., 2005; 704 p. (in Eng.).

[14] Shchul'tse G. Metal Physics (Metallofizika). Moscow: Mir Publ., 1971; 503 p. (in Russ.).

[15] Samsonov G.V. Refractory compounds (Tugoplavkie soedineniya). Moscow: Metallurgiya Publ., 1976; 580 p. (in Russ.).

[16] Storms E. Refractory carbides (Tugoplavkie karbidy). Moscow: Atomizdat Publ., 1970; 304 p. (in Russ.).

[17] Chirkin V.S. Thermophysical properties of materials of nuclear engineering (Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoi tekhniki). Moscow: Atomizdat Publ., 1967; 474 p. (in Russ.).

[18] Prekul A.F., Kazantsev V.A., Schegolina N.I., Gulyaeva R. I., Edagawa K. High-temperature heat capacity of Al₆₃Su₂₅Fe₁₂ quasicrystal (Vysokotemperaturnaya teploemkost' kvazikristalla Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂). *Fizika tverdogo tela*, 2008;50(11):1933–1935 (in Russ.).

[19] Denisov V.M., Denisova L.T., Irtyugo L.A., Patrin G.S., Volkov N.V., Chumilina L.G. High-temperature heat capacity Y_{2,9}Ho_{0,1}Al₅O₁₂ (Vysokotemperaturnaya teploemkost' Y_{2,9}Ho_{0,1}Al₅O₁₂). *Fizika tverdogo tela*, 2013;55(4):636–638 (in Russ.).

[20] Denisov V.M., Denisova L.T., Chumilina L.G., Kirik S.D., Belousova N.V. High-temperature heat capacity Du₂SuO₅ (Vysokotemperaturnaya teploemkost' Dy₂Cu₂O₅). *Fizika tverdogo tela*, 2013;55(9):1714–1716 (in Russ.).

[21] Denisova L.T., Denisov V.M., Gudim I.A., Temerov V.L., Volkov N.V., Patrin G.S., Chumilina L.G. High-temperature heat capacity of TbFe₃(BO₃)₄ (Vysokotemperaturnaya teploemkost' TbFe₃(BO₃)₄). *Fizika tverdogo tela*, 2014;56(5):892–894 (in Russ.).

[22] Denisova L.G., Chumilina L.G., Denisov V.M., Kirik S.D., Belousova N.V. The study of heat capacity Lu₂Su₂O₅ in area 366-992 K (Issledovanie teploemkosti Lu₂Cu₂O₅ v oblasti 366-992 K). *Fizika tverdogo tela*, 2014;56(3):620–622 (in Russ.).

[23] Kravets S.L., Osipov Y.S. Great Russian Encyclopedia (Bol'shaya Rossiiskaya Entsiklopediya). Moscow: BRE Publ., 2007, vol. 8; 767 p. (in Russ.).

[24] Epifanov G.M. Solid state physics (Fizika tverdogo tela). 4-edit. St. Petersburg: Lan' Publ., 2011; 288 p. (in Russ.).



[25] Gurtov V.A. Solid state physics for engineers (Fizika tverdogo tela dlya inzhenerov). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2012; 560 p. (in Russ.)

[26] Burdiyan I.I., Batalin V.A. Teploprovodnost' i teploemkost' stekol sostava $(As_2S_3)_x(As_2Se_3)_{1-x}$ / I. I. Burdiyan. *Neorganicheskie materialy*, 1995;31(1):127–128 (in Russ.).

Транслитерация по BSI



Десятая Межотраслевая конференция «АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА-2019»

27 марта 2019 г. в гостиничном комплексе «ИЗМАЙЛОВО» (г. Москва) состоится Десятая Межотраслевая конференция «АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА-2019», посвященная демонстрации промышленных лакокрасочных материалов и лучших технологий для противокоррозионной защиты, огнезащиты и изоляции, электрохимической защиты, приборам контроля качества защитных покрытий, приборам неразрушающего контроля, окрасочному оборудованию, современным решениям для усиления и восстановления строительных конструкций зданий, сооружений и технологического оборудования промышленных предприятий.

Организатор конференции – ООО «ИНТЕХЭКО».

На конференции выступают представители ведущих производителей лакокрасочных материалов и инжиниринговых компаний России, США, Германии, Финляндии, Украины, Белоруссии и других стран мира. В докладах известных отраслевых экспертов отражены результаты новейших разработок в области противокоррозионной защиты, изоляции, огнезащиты и промышленной безопасности.

Основные темы докладов:

- Актуальные задачи противокоррозионной защиты в промышленности.
- Промышленные лакокрасочные материалы отечественных и зарубежных производителей.
- Новейшие технологии и материалы огнезащиты, изоляции и антикоррозионной защиты строительных конструкций зданий и сооружений, мостов, технологического оборудования, газоходов, трубопроводов, дымовых труб, газотранспортных систем, емкостей и другого оборудования промышленных предприятий нефтегазовой отрасли, энергетики, металлургии и других отраслей промышленности.
 - Обследование и экспертиза промышленной безопасности строительных конструкций зданий и сооружений, подверженных агрессивному воздействию среды, включая опасные промышленные объекты.
 - Предупреждение аварий. Усиление и восстановление зданий и оборудования.
 - Современные методы, системы и средства контроля и диагностики техногенной безопасности предприятий.
 - Современные тенденции развития промышленных лакокрасочных покрытий.
 - Лучшие образцы красок и лакокрасочных материалов для защиты от коррозии, изоляции и огнезащиты.
 - ЛКМ для наружной окраски. Долговечность покрытий
 - Электрохимическая защита металлов от коррозии.
 - Отделочные материалы – качество и безопасность продукции.
 - Подготовка поверхности. Окраска изделий из различных материалов.
 - Современное окрасочное оборудование.
 - Контроль качества лакокрасочной продукции и окрасочных работ
 - Проектирование сооружений и технологического оборудования, в том числе высотных выхлопных труб, газоходов, скрубберов, элементов строительных конструкций и т.п. из коррозионностойких неметаллических материалов (слоистые пластики, химстойкие бетоны).
 - Конструкции и устройство монолитных полимерных полов в промышленном и гражданском строительстве.
 - Технологии торкретирования бетона как метод защиты и восстановления железобетонных конструкций.
 - Современные приборы для контроля качества лакокрасочных материалов и покрытий.
 - Диагностика технического состояния трубопроводов и промышленного оборудования.
 - Экспертиза промышленной безопасности, новые технологии, приборы и методы определения коррозии металлов и остаточного ресурса оборудования.
 - Приборы неразрушающего контроля. Ультразвуковые дефектоскопы и толщиномеры, видеоскопы, бороскопы, XRF и XRD анализаторы, промышленные сканеры.
 - Технические и юридические аспекты гарантий антикоррозионной защиты.

Организатор конференции ООО «ИНТЕХЭКО»

К участию в конференции приглашаются ведущие российские и зарубежные разработчики и производители современных технологий противокоррозионной защиты, ЛКМ, различных материалов для защиты от коррозии, изоляции, огнезащиты, решений для усиления и восстановления зданий и технологического оборудования, окрасочного оборудования и приборов контроля качества защитных покрытий и коррозионного состояния, разработчики методов электрохимической защиты, а также ответственные руководители и специалисты промышленных предприятий энергетики, металлургии, горнодобывающего и горнорудного комплексов, гражданского и оборонного машиностроения, химической, нефтеперерабатывающей, нефтегазовой, цементной, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности.

<http://www.intecheco.ru/anticor/>

