

8. State Standard GOST 9454–78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyi izgib pri ponizhennykh, komnatnoi i povyshennykh temperaturakh [Metals. Test method for impact strength at low, ambient and elevated temperatures] [in Russian].
9. State Standard GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniya na rastyazhenie [Metals. Methods of tensile test] [in Russian].
10. The application for the invention N 2012113780. published: 20.10.2013.
11. Archakov Yu. I. Vodorodnaya korroziya stali [Hydrogen corrosion of steel]. — M.: Metallurgiya, 1985. — 192 p. [in Russian].
12. Paliy R. V., Prokhorov N. N., Makarenko V. D. Vliyanie vodoroda na mekhanizm korrozionnogo razrusheniya promyslovyykh truboprovodov [Effect of hydrogen on the mechanism of corrosion damage flowlines] / Khim. Neftegaz. Mashinostr. 2002. N 5. P. 47 – 49 [in Russian].
13. Vatnik L. E., Trishkina I. A., Trykov Y. P., Gurevich L. M. Struktura khromomolibdenovykh staley zmeevikov tekhnologicheskikh pechei neftepererabatyvayushchikh ustanovok [The structure of chrome-molybdenum steel coils of the furnaces petrochemical plants] / Remont. Vosstanovl. Moderniz. 2007. N 5. P. 48 – 53 [in Russian].
14. Grabke H. J. Korrosionsschäden in petrochemischen Anlagen (Teil 2). Metal Dusting / Mater. Corrosion. 2003. Vol. 54. N 10. P. 736 – 740.
15. Reis G. S., Jorge A. M., Balancin O. Influence of the microstructure of duplex stainless steels on their failure characteristics during hot deformation / Mater. Res. 2000. Vol. 3. P. 31 – 35.
16. Young R. A. Introduction to the Rietveld Method. — Oxford: Oxford University Press, 1993. P. 1 – 39.
17. Medvedeva M. L. Ob osnovnykh prichinakh otkazov pechnykh zmeevikov na ustanovkakh visbrekinga i putyakh ikh ustraneniya [On the main causes of fail of the coil furnace visbreaking and ways to overcome them] / Khimiya Tekhnol. Topliv Masel. 1998. N 4. P. 26 [in Russian].
18. Hsieh C. C., Lin D. Y., Chang T. N. Microstructural evolution during the $\delta/\sigma/\gamma$ phase transformation of the SUS 309LSi stainless steel after aging under various nitrogen atmospheric ratios / Mater. Sci. Engin. 2008. Vol. 475. N 1 – 2. P. 128 – 135.
19. Ravindranath K., Malhotra S. N. Influence of aging on intergranular corrosion of a 25 % chromium – 5 % nickel duplex stainless steel / Corrosion. 1994. Vol. 50. N 4. P. 318 – 328.
20. Barcik J. Mechanism of σ -phase formation in Cr-Ni austenitic steels / Mater. Sci. Technol. 1988. Vol. 4. N 5. P. 15.
21. Sourmail T. Precipitates in creep resistant austenitic stainless steels / Mater. Sci. Technol. 2001. Vol. 17. N 1. P. 1 – 14.
22. Kachanov N. N., Mirkin L. I. Rentgenostrukturnyi analiz (polikristallov). Prakticheskoe rukovodstvo [X-ray analysis (polycrystallines). A Practical Guide]. — Moscow, 1969. — 215 p. [in Russian].
23. Powder Diffraction File. JCPDS. International Center for Diffraction Data (ICDD). 2008.
24. Chih-Chun H., Weite W. Overview of intermetallic sigma (σ) phase precipitation in stainless steels / Int. Schol. Res. Network. Metallurgy. 2012. — 16 p.

УДК 536.631:620.19

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ

© Ю. В. Лощинин, Ю. И. Фоломейкин, С. И. Пахомкин¹

Статья поступила 18 ноября 2014 г.

Изложены результаты измерений удельной теплоемкости образцов металлических материалов (нержавеющей стали 12X18H9T, жаропрочного никелевого сплава ВЖМ-4) с термостойким силикатным эмалевым покрытием в диапазоне температур 20 – 1300 °С методом лазерной вспышки. В указанном температурном диапазоне покрытие характеризуется высокой и постоянной по величине степенью черноты, равной 0,9. Из анализа результатов измерений теплоемкости образцов стали и сравнения их со справочными и наиболее надежными литературными данными установлено, что уменьшение кажущейся теплоемкости в интервале температур 850 – 1100 °С вызвано экзотермическим тепловым эффектом. Отклонение результатов измерений от справочных данных составило не более 3 %. Получены новые данные по теплоемкости никелевого сплава ВЖМ-4. Описаны зависимости от температуры кажущейся (с учетом теплового эффекта растворения γ' -фазы) и истинной теплоемкостей. Отклонение расчетных значений от измеренных — не более 2 %.

Ключевые слова: удельная теплоемкость; температуропроводность; теплопроводность; метод лазерной вспышки; термостойкие силикатные эмалевые покрытия; адиабатический калориметр; степень черноты полного излучения.

В основе технологии производства литых лопаток из жаропрочных сплавов лежит химический состав материала, режимы литья и конструкторские решения

оборудования и оснастки литья [1]. Оптимизация режимов процесса кристаллизации с целью получения заданной структуры невозможна без знаний физических свойств сплавов, используемых в математическом моделировании процессов теплообмена [2]. Од-

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ»), Москва, Россия.

нако точное и надежное определение характеристик теплофизических свойств жаропрочных сплавов при высоких температурах связано с трудностями, вызываемыми взаимодействием образцов испытуемых сплавов с материалом держателя и окружающей средой. Эти трудности относятся, прежде всего, к определению удельной теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии, в соответствии с которым подводимый к образцу тепловой поток калибруется по тепловому потоку, направленному к стандартному образцу из сапфира. Неодинаковые условия теплообмена испытуемого и стандартного образцов, особенно при высоких температурах, вызывают значительные погрешности измерений. Один из вариантов преодоления этих проблем — совершенствование импульсного метода лазерной вспышки определения теплоемкости, широко применяемого в основном при исследовании температуро- и теплопроводности металлических и неметаллических материалов. Реализация метода успешно решена в приборах серии TC (SINKU-RIKO, Япония), LFA (NETZSCH, Германия), DLF и EM (TM Instruments, США).

Удельную теплоемкость исследуемого материала при нагревании его коротким импульсом тепловой энергии излучения лазера или ксеноновой лампы определяют по измеренному максимальному увеличению температуры образца и энергии поглощенного теплового импульса. Основные требования при измерениях теплоемкости методом лазерной вспышки [3], помимо выполнения условий адиабатического нагрева образца, следующие: постоянная величина испускаемой энергии лазерного излучения, стабильность характеристик детектора измерения подъема температуры, постоянная и желательна максимально высокая по величине степень черноты полного излучения поверхности исследуемого образца, на которую визируется излучение лазерного импульса. Количество энергии в импульсе, излучаемое лазером и воспринимаемое объектом, обычно определяют из предварительных калибровочных измерений стандартного образца сапфира (α -модификация Al_2O_3) с известной теплоемкостью [3]. Если теплоемкость исследуемого объекта определяют в тех же условиях и с теми же излучательными свойствами поверхности, что и у стандартного образца, то из условия равенства тепловых потоков, воспринимаемых стандартным и исследуемым образцами, следует:

$$C_{px}^{20} = C_{pct}^{20} \frac{\Delta T_{ct}^{20}}{\Delta T_x^{20}} \frac{m_{ct}}{m_x}, \quad (1)$$

где C_{px}^{20} , ΔT_x^{20} , m_x и C_{pct}^{20} , ΔT_{ct}^{20} , m_{ct} — удельные теплоемкости, изменения температуры, массы исследуемого и стандартного образцов соответственно при комнатной температуре (20 °C). Если измерения проводят при высоких температурах, то тепловой поток счита-

ют одинаковым и теплоемкость выражают через изменение температуры исследуемого образца при 20 °C:

$$C_{px}(T_i) = C_{px}^{20} \frac{\Delta T_x^{20}}{\Delta T_x(T_i)}, \quad (2)$$

где $C_{px}(T_i)$ и $\Delta T_x(T_i)$ — удельная теплоемкость и изменение температуры исследуемого образца при температуре T_i после поглощения теплового импульса.

Как известно, при относительных измерениях теплоемкости необходимо соблюдать идентичность условий теплообмена образцов эталонного и исследуемого материалов. Относительные методы измерения отличаются простотой и приемлемой погрешностью (3 – 5 %).

При последовательных измерениях теплоемкости образца исследуемого материала испускаемая энергия лазерного излучения стабильна и имеет очень близкие значения. Обычно величину излучаемой энергии контролируют специальным датчиком и при отличных значениях в расчет вносят соответствующий коэффициент. Энергия теплового импульса, воспринимаемая образцом исследуемого материала, может быть равна калибровочному значению только в случае близких значений степени черноты поверхности (наносимого покрытия) исследуемого образца и стандартного известной теплоемкости.

При подготовке образцов к измерению удельной теплоемкости при температурах выше 20 °C на поверхность, подвергаемую воздействию теплового лазерного импульса, наносят графитовое покрытие, гарантирующее стабильность степени черноты до 800 °C [3].

Для определения теплоемкости материалов на металлической основе методом лазерной вспышки выше 800 °C, поверхность образцов которых изменяет при высоких температурах свои излучательные свойства, можно использовать специальные неорганические покрытия с высокой излучательной способностью. Так, при горячей деформации и термообработке для защиты от окисления дисков и других деталей газотурбинного двигателя, для защиты от газовой коррозии и эрозии при эксплуатации деталей из жаропрочных, тугоплавких, титановых и бериллиевых сплавов широко используются различные высокотемпературные силикатные эмалевые покрытия (ВСЭП) [4 – 8]. Технология их нанесения достаточно просто реализуется как в промышленных условиях, так и в научных лабораториях. ВСЭП, включающие в свой состав оксиды различных металлов, обладают более высокой степенью черноты (0,85 – 0,95) по сравнению с металлами и чистыми оксидами, сохраняя ее при температурах выше 1000 °C [4, 6].

Оценка использованного нами ВСЭП марки ЭВК-103 проведена при измерении удельной теплоемкости трех образцов нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H9T (ГОСТ 5632–72) в диапазоне температур 20 – 1300 °C. Теплофизические свой-

Результаты измерений удельной теплоемкости (C_p) образцов нержавеющей стали 12X18H9T

Образец № 1				Образец № 2				Образец № 3			
$T, ^\circ\text{C}$	C_p Дж/(г · К)	Отклонение от стандартных данных [9], %	Отклонение от данных [11], %	$T, ^\circ\text{C}$	C_p Дж/(г · К)	Отклонение от стандартных данных [9], %	Отклонение от данных [11], %	$T, ^\circ\text{C}$	C_p Дж/(г · К)	Отклонение от стандартных данных [9], %	Отклонение от данных [11], %
20	0,476	3,6	3,8	30	0,465	0,5	0,1	27	0,482	3,3	3,1
29	0,471	1,9	1,5	31	0,465	0,4	0,0	28	0,479	3,7	3,4
30	0,472	2,0	1,6	100	0,484	0,1	-2,0	100	0,493	2,0	-0,2
30	0,472	2,0	1,6	101	0,486	0,5	-1,7	100	0,500	3,4	1,2
127	0,512	4,2	1,9	203	0,510	-0,4	-2,1	215	0,523	1,6	0,0
134	0,513	4,0	1,7	299	0,556	3,7	3,2	218	0,525	1,8	0,2
196	0,519	1,8	0,0	357	0,557	1,4	1,5	312	0,547	1,5	1,1
254	0,539	2,7	1,6	406	0,551	-1,6	-1,0	314	0,533	-1,2	-1,5
321	0,544	0,5	0,3	452	0,562	-1,3	-0,3	411	0,556	-0,9	-0,2
325	0,546	0,7	0,5	501	0,567	-2,1	-0,9	530	0,570	-2,5	-1,2
408	0,567	1,1	1,8	553	0,584	-0,8	0,6	607	0,580	-3,0	-1,7
501	0,574	-0,9	0,4	594	0,581	-2,5	-1,1	728	0,611	-0,8	-0,1
504	0,577	-0,5	0,8	615	0,585	-2,4	-1,0	821	0,621	-1,0	-1,3
610	0,584	-2,4	-1,1	651	0,588	-2,8	-1,6	1001	0,614	-4,5	-8,1
700	0,603	-1,5	-0,5	700	0,603	-1,5	-0,5	1107	0,615	-5,1	-11,2
810	0,615	-1,7	-2,0	746	0,607	-1,8	-1,3	1152	0,629	-3,2	-10,6
850	0,622	-1,3	-2,1	801	0,606	-3,0	-3,1	1202	0,647	-0,6	-9,7
907	0,620	-2,4	-4,2	895	0,617	-2,7	-4,3	1203	0,642	-1,3	-10,5
950	0,610		-7,1	973	0,619	-3,4	-6,4	1205	0,661	1,6	-7,9
951	0,617		-6,0	—	—	—	—	—	—	—	—
1005	0,625		-6,5	—	—	—	—	—	—	—	—
1054	0,634		-6,8	—	—	—	—	—	—	—	—
1057	0,638		-6,3	—	—	—	—	—	—	—	—
1106	0,661		-4,6	—	—	—	—	—	—	—	—
1108	0,664		-4,2	—	—	—	—	—	—	—	—
1161	0,670		-5,1	—	—	—	—	—	—	—	—
1202	0,680		-5,1	—	—	—	—	—	—	—	—
1208	0,680		-5,3	—	—	—	—	—	—	—	—
1274	0,689		-6,4	—	—	—	—	—	—	—	—

ства этой стали используются в качестве стандартных справочных данных [9, 11].

Образцы диаметром 10 и толщиной 1 мм изготавливали из прутка с химическим составом, % масс.: 17,0 — Cr; 9,1 — Ni; 0,66 — Ti; 1,40 — Mn; 0,1 — C; 0,02 — S; 0,035 — P; 0,7 — Si, идентичным составу стали, использованной в работе [9]. Измерения проведены на установке лазерной вспышки ТС-3000H/L (SINKU-RIKO, Япония). Для создания одинаковых условий теплообмена удельную теплоемкость при комнатной температуре измеряли с применением того же диска глазированного углерода, закрепляемого на поверхности образцов, что и при калибровке мощности теплового излучения лазера по образцу из сапфира [3]. Глазированный углерод применяли, поскольку это вещество с хорошо известной теплоемкостью. Исходя из калиброванной величины мощности лазерного излучения и измеренного увеличения температуры, среднее значение удельной теплоемкости образцов при 20 °С, найденное по (1) с учетом массовой теплоемкости диска из глазированного углерода, составило 0,476 Дж/(г · К). Рекомендуемое значение удельной теплоемкости нержавеющей стали

12X18H9T по стандартным справочным данным — 0,472 Дж/(г · К) [9].

Перед измерением удельной теплоемкости при 20 – 1300 °С на образцы, предварительно взвешенные на аналитических весах с точностью не хуже 10 мг, шликерным способом наносили ВСЭП марки ЭВК-103. Поверхность лазерного нагрева перед нанесением покрытия подвергали пескоструйной обработке. Окончательные свойства покрытия приобретает после обжига при температуре 1200 °С [4]. Толщина покрытия, измеренная микрометром МК, составила 72 – 75 мкм. При этом непрозрачная для излучения толщина эмалевых силикатных покрытий — не менее 40 мкм.

Результаты измерений представлены в таблице. Проведено их сравнение, во-первых, с данными по образцу той же стали с графитовым покрытием в температурном диапазоне 20 – 800 °С, полученными на установке ТС-3000H, во-вторых, с результатами измерений на адиабатическом калориметре SH-3000M (SINKU-RIKO, Япония) в диапазоне температур 20 – 850 °С. Учитывали также справочные данные [9], полученные методом смешения при 20 – 1100 °С

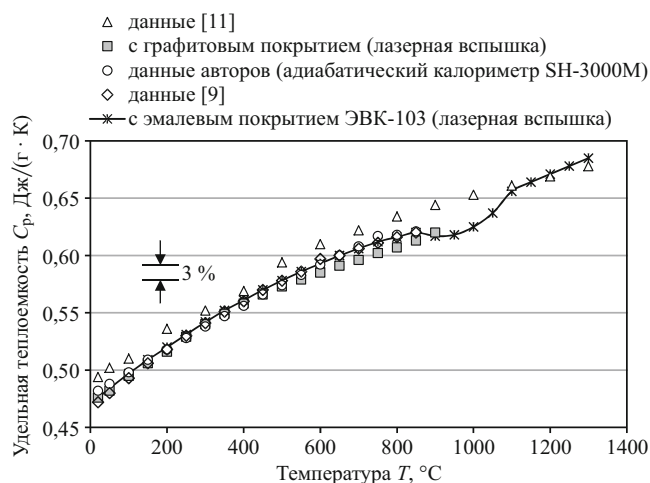


Рис. 1. Результаты измерений удельной теплоемкости образцов нержавеющей стали 12Х18Н9Т с покрытиями ЭВК-103 и графитовым, полученные методами лазерной вспышки при нагревании в вакууме (0,1 Па) и адиабатической калориметрии в аргоне

(рис. 1). На рис. 1 представлены и обобщенные данные, полученные методами смешения и адиабатической калориметрии при 20 – 1200 °С [11].

Обращает на себя внимание относительное уменьшение удельной теплоемкости при 850 – 1100 °С (см. рис. 1), что можно объяснить процессом окисления образцов. В нашем случае большая часть их поверхности не имела покрытия, процесс окисления экзотермический. Это и вызвало уменьшение кажущейся удельной теплоемкости в данном температурном диапазоне.

Относительное уменьшение удельной теплоемкости выше 850 °С отмечается и при сравнении с данными по кажущейся теплоемкости, полученными в адиабатическом калориметре SH-3000M при непрерывном нагревании (см. рис. 1).

Из результатов измерений, полученных методом смешения [9, 11], определяли среднюю и истинную теплоемкости, характеризующие изменение энтальпии без учета окисления. Отклонение результатов измерений (см. таблицу) в диапазоне температур 20 – 900 °С от справочных данных [9] и данных [11] не превышает 3 %.

Методику определения теплоемкости с нанесением ВСЭП ЭВК-103 на поверхность образцов использовали для исследования удельной теплоемкости жаропрочного монокристаллического никелевого сплава ВЖМ-4 в интервале температур 20 – 1330 °С. Надежность полученных результатов оценивали в сравнении с данными измерений на адиабатическом калориметре SH-3000M в диапазоне температур 20 – 850 °С (рис. 2), а также с теплоемкостью сплава CMSX-10, близкого по составу ВЖМ-4, полученной на DSC калориметре [12].

При 800 – 1290 °С для сплава ВЖМ-4 наблюдается значительное увеличение удельной теплоемкости,

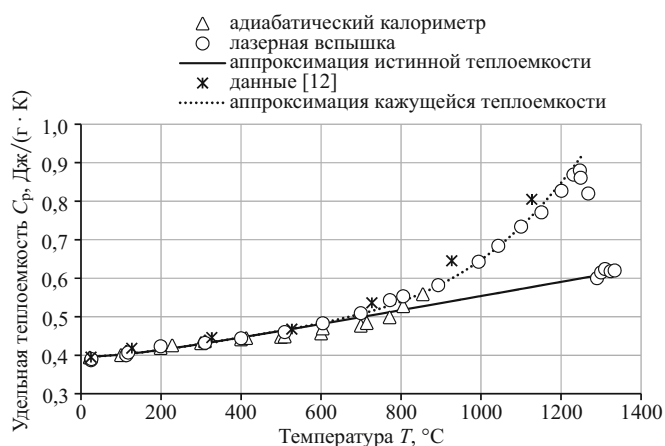


Рис. 2. Результаты измерений удельной теплоемкости сплава ВЖМ-4 с покрытием ЭВК-103 методом лазерной вспышки в сравнении с данными, полученными на адиабатическом калориметре при нагревании в аргоне, и с данными по сплаву CMSX-10 [12]

объясняемое эндотермическим эффектом растворения интерметаллидной γ' -фазы (рис. 2). Зависимость теплоемкости от температуры можно описать эмпирическим выражением:

$$C_p = 0,3163 + 1,854 \cdot 10^{-4}T + 2228T^{-2} + 2,207 \cdot 10^9 T^{-2} \exp(-12200/T), \quad (3)$$

где $293 \leq T \leq 1523$ К.

Температура 1250 °С — «пик» на кривой аппроксимации кажущейся теплоемкости — характеризует растворение γ' -фазы в интервале 800 – 1250 °С и близка к температуре полного растворения ($T_{\text{пр}\gamma'} = 1290$ °С). Выше 1290 и ниже ~800 °С истинная теплоемкость хорошо описывается выражением

$$C_p = 0,3163 + 1,854 \cdot 10^{-4}T + 2228T^{-2}, \quad (4)$$

соответствующим стабильному структурному состоянию сплава ВЖМ-4. Отклонения результатов измерений удельной теплоемкости от значений, рассчитанных по выражениям (3) и (4), не превышают 2 %.

Таким образом, на основании анализа результатов использования ВСЭП для защиты изделий из жаропрочных сплавов и сплавов на основе тугоплавких металлов, а также из ранее изученных излучательных свойств ВСЭП обосновано их применение при измерении теплоемкости методом лазерной вспышки. Проведены измерения удельной теплоемкости нержавеющей стали 12Х18Н9Т методом лазерной вспышки в диапазоне температур 20 – 1300 °С с применением ВСЭП ЭВК-103. Отклонение полученных результатов от наиболее надежных опубликованных данных не превышает 3 %. Проведены исследования и получены новые данные по удельной теплоемкости жаропрочного никелевого монокристаллического сплава ВЖМ-4 в диапазоне температур 20 – 1330 °С. Результаты измерений аппроксимированы выражениями

для кажущейся и истинной удельной теплоемкости. Отклонение результатов измерений от расчетных значений не превышает 2 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каблов Е. Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). — М.: МИСиС, 2006. — 632 с.
2. **Калинин Д. Ю., Каблов Е. Н.** Моделирование и управление процессами теплообмена при направленной кристаллизации жаропрочных сплавов / В сб. материалов V Минского Международного форума по тепло- и массообмену. — Минск, 2004. С. 9 – 15.
3. ASTM E 1461–01. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. 2001. P. 1 – 13.
4. **Солнцев С. С.** Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. — М.: Машиностроение, 1984. — 256 с.
5. **Солнцев С. С., Розененкова В. А., Миронова Н. А., Гаврилов С. В.** Керамические покрытия для защиты высокопрочной стали при термической обработке / Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4. С. 3 – 8.
6. **Солнцев С. С., Швагирева В. В., Исаева Н. В., Соловьева Г. А.** Армированные жаростойкие стеклоэмали для камер сгорания газотурбинных двигателей / Авиационные материалы и технологии. 2010. № 1. С. 26 – 29.
7. **Солнцев С. С., Розененкова В. А., Миронова Н. А.** Высокотемпературные стеклокерамические покрытия и композиционные материалы / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 359 – 368.
8. **Каблов Е. Н., Солнцев С. С., Розененкова В. А., Миронова Н. А.** Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических волокнистых материалов и бериллиевых сплавов / Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 1. Ст. 05. (materialsnews.ru).
9. **Гомельский К. З., Лугинина В. Ф., Сеникова В. Н.** Таблицы стандартных справочных данных. Стали 12X18H9T и 12X18H10T. Удельная энтальпия и удельная теплоемкость в диапазоне температур 400 – 1380 К при атмосферном давлении. ГСССД 32–82. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 12 с.
10. **Minges V. L.** Evaluation of Thermophysical Properties Measurement Methods and Standard Reference Materials / CODATA Bulletin. 1986. February. P. 24.
11. **Чеховской В. Я., Тарасов В. Д., Арсеев И. В.** Экспериментальное исследование теплоемкости и энтальпии сталей аустенитного класса 12X18H9T и 12X18H10T в интервале температур 300 – 1678 К / Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39. № 3. С. 450 – 459.
12. **Questaed P. N., Brooks R. F., Chapman L., Morrell R., Youssef Y., Mills K. C.** Measurement and estimation of thermophysical properties of nickel based superalloys / Materials Science and Technology. 2009. Vol. 25. N 2. P. 154 – 162.
2. **Kalinin D. Yu., Kablov E. N.** Modelirovanie i upravlenie protsessami teploobmena pri napravlennoi kristallizatsii zharoprochnykh spлавov [Modeling and control of the processes of heat transfer during directional solidification superalloys] / Proc. of the V Minsk International forum on heat and mass transfer. — Minsk, 2004. P. 9 – 15 [in Russian].
3. ASTM E 1461–01. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. 2001. P. 1 – 13.
4. **Solncev S. S.** Zashchitnye tekhnologicheskie pokrytiya i tugo-plavkie éмали [Protective technological coatings and refractory enamel]. — Moscow: Mashinostroenie, 1984. — 256 p. [in Russian].
5. **Solncev S. S., Rozenenkova V. A., Mironova N. A., Gavrilov S. V.** Keramicheskie pokrytiya dlya zashchity vysokoprochnoi stali pri termicheskoi obrabotke [Ceramic coating to protect high-strength steel during heat treatment] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2011. N 4. P. 3 – 8 [in Russian].
6. **Solncev S. S., Shvagireva V. V., Isaeva N. V., Solov'eva G. A.** Armirovannye zharostoikiye stekloémali dlya kamer sgoraniya gazoturbinnnykh dvigatelei [Reinforced heat-resistant glass enamel for combustion chambers of gas turbine engines] / Aviats. Mater. Tekhnol. 2010. N 1. P. 26 – 29 [in Russian].
7. **Solncev S. S., Rozenenkova V. A., Mironova N. A.** Vysokotemperaturnye steklokeramicheskie pokrytiya i kompozitsionnye materialy / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N 5. P. 359 – 368 [in Russian].
8. **Kablov E. N., Solncev S. S., Rozenenkova V. A., Mironova N. A.** Sovremennye polifunktsional'nye vysokotemperaturnye pokrytiya dlya nikelovykh spлавov, uplotnitel'nykh metallicheskikh voloknistykh materialov i berillievyykh spлавov [Modern multifunctional high-temperature coatings for nickel alloys, metal sealing fibrous materials and beryllium alloys] / Novosti Materialoved. Nauka Tekhnika. 2013. N 1. St. 05 (materialsnews.ru) [in Russian].
9. **Gomel'skii K. Z., Luginina V. F., Sennikova V. N.** Tablitsy standartnykh spravochnykh dannykh. Stali 12Kh18N9T i 12Kh18N10T. Udel'naya éntal'piya i udel'naya teploemkost' v diapazone temperatur 400 – 1380 K pri atmosfernom davlenii. GSSSD 32–82 [Tables of standard reference data. Steel 12X18H9T and 12X18H10T. Specific enthalpy and specific heat in the temperature range 400 – 1380 K at atmospheric pressure. GSSSD 32–82]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1983. — 12 p.
10. **Minges V. L.** Evaluation of Thermophysical Properties Measurement Methods and Standard Reference Materials / CODATA Bulletin. 1986. February. P. 24.
11. **Chekhovskoi V. Ya., Tarasov V. D., Arseev I. V.** Éksperimental'noe issledovanie teploemkosti i éntal'pii stali austenitnogo klassa 12Kh18N9T i 12Kh18N10T v intervale temperatur 300 – 1678 K [Experimental investigation of heat capacity and enthalpy of austenitic steels 12Kh18N9T and 12Kh18N10T in the temperature range 300 – 1678 K] / Teplofiz. Vys. Temp. 2001. Vol. 39. N 3. P. 450 – 459 [in Russian].
12. **Questaed P. N., Brooks R. F., Chapman L., Morrell R., Youssef Y., Mills K. C.** Measurement and estimation of thermophysical properties of nickel based superalloys / Materials Science and Technology. 2009. Vol. 25. N 2. P. 154 – 162.

REFERENCES