

УДК 536.41:669.245

Плотность и тепловое расширение сплава Inconel 718 в твердом и жидком состояниях*

Р.Н. Абдуллаев^{1,2}, Р.А. Хайрулин¹, С.В. Станкус¹, Ю.М. Козловский¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: abdullaev.rasul88@gmail.com

Дилатометрическим методом и методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения измерены плотность и коэффициенты теплового расширения сплава Inconel 718 в интервале температур 293,15–1730 К твердого и жидкого состояний. Измерен скачок плотности при фазовом переходе твердое тело–жидкость. Проведено сравнение данных настоящей работы с результатами других авторов.

Ключевые слова: гамма-метод, дилатометрический метод, сплав Inconel 718, плотность, тепловое расширение.

Сплав Inconel 718 — один из наиболее часто применяемых в промышленности жаропрочных сплавов на основе никеля. Благодаря своим превосходным механическим свойствам [1–3] этот материал широко используется при изготовлении конструктивных элементов ракетных и авиационных двигателей, космических аппаратов и ядерных реакторов. Для оптимизации технологий производства и применения этого сплава и продукции на его основе необходимы надежные данные по его термическим свойствам в твердом и жидком состояниях и их изменениям при кристаллизации–плавлении. Однако расхождение известных на сегодняшний день литературных данных по плотности в твердом состоянии при высоких температурах достигает 1 % [4, 5], а в жидком — 2,6 % [4–6]. В связи с этим цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании плотности и теплового расширения сплава Inconel 718 в интервале температур 293,15–1730 К твердого и жидкого состояний и измерении скачка плотности сплава при фазовом переходе твердое тело–жидкость.

Плотность ρ_t сплава Inconel 718 при комнатной температуре $T_t = 293,15$ К измерялась методом косвенного гидростатического взвешивания. В качестве эталонной жидкости использовалась дистиллированная деаэрированная вода. Полученное значение ρ_t составило (8170 ± 4) кг/м³. Тепловое расширение сплава Inconel 718 в твердом состоянии исследовалось дилатометрическим методом на автоматизированном горизонтальном дилатометре NETZSCH DIL-402C. Измерения проводились по методике, аналогичной той,

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (AAAA-A17-117022850029-9).

которая использовалась при изучении теплового расширения твердого никеля [7]. Результаты измерений представлялись в виде температурной зависимости относительного удлинения образца ε при нагреве или охлаждении:

$$\varepsilon(T) = \frac{L(T) - L_{293}}{L_{293}},$$

где $L(T)$ и L_{293} — длина образца при температурах T и 293,15 К соответственно. Для получения температурной зависимости линейного коэффициента теплового расширения (ЛКТР) α первичные данные по относительному удлинению численно дифференцировались по методике [7].

Тепловое расширение твердого сплава исследовалось в интервале температур 293–1473 К в нескольких циклах нагрева–охлаждения образца. В пределах случайных погрешностей все результаты совпали между собой. В диапазоне температур от $T_C = 760$ К до $T_D = 1180$ К сплав испытывал ряд структурных превращений [5, 8], в ходе которых изменение ε составило $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon(T_C) - \varepsilon(T_D) = (9018 \pm 62) \cdot 10^{-6}$. Аппроксимация экспериментальных данных по ЛКТР методом наименьших квадратов выше и ниже области структурных переходов дала следующие зависимости:

$$\alpha(T) \cdot 10^6 = 10,75 + 10,03 \cdot 10^{-3} T - 4,2 \cdot 10^{-6} T^2, \text{ К}^{-1}; \quad 293,15 \text{ К} \leq T \leq 760 \text{ К},$$

$$\alpha(T) \cdot 10^6 = 13,49 + 6,45 \cdot 10^{-3} T, \text{ К}^{-1}; \quad 1180 \text{ К} \leq T \leq 1473 \text{ К}.$$

Термические свойства расплава Inconel 718 и изменения его плотности при кристаллизации исследовались методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения (гамма-метод) в тигле из оксида бериллия. Экспериментальная установка и методика измерений были подробно описаны в работах [9, 10]. Кристаллизация расплава Inconel 718 проходила в широком интервале температур: от температуры ликвидуса $T_L = 1608$ К до температуры солидуса $T_S = 1532$ К. Экстраполяция результатов dilatометрических измерений (с учетом ρ_f) к T_S позволила вычислить значение плотности твердого образца в точке солидуса $\rho_c(T_S) = (7614,5 \pm 5,7) \text{ кг/м}^3$. Относительное изменение плотности сплава при затвердевании $\delta\rho_{LS}$ рассчитывалось с помощью соотношения [10]:

$$\delta\rho_{LS} = \frac{\rho_c(T_S) - \rho_m(T_L)}{\rho_c(T_S)} = 1 - \left\{ \frac{\ln[J_0(T_L)/J_L]}{\ln[J_0(T_S)/J_S]} \right\} \cdot \left\{ \frac{1 + \bar{\alpha}_g(T_S) \cdot (T_S - T_f)}{1 + \bar{\alpha}_g(T_L) \cdot (T_L - T_f)} \right\},$$

здесь J_0, J — интенсивности пучка излучения, прошедшего через пустую и заполненную (с образцом) измерительную ячейку соответственно, ρ_c, ρ_m — плотность твердого и жидкого образца соответственно, $\bar{\alpha}_g$ — средний линейный коэффициент теплового расширения материала тигля; индексы S и L относят соответствующие величины к твердому (при температуре T_S) и жидкому (при температуре T_L) состояниям образца. Измеренное значение $\delta\rho_{LS}$ составило $(3,1 \pm 0,2) \%$. Эта величина совпадает с результатом, полученным dilatометрическим методом [4], и существенно выше значения, полученного методом импульсного нагрева (2,5 %) [5]. Заниженное значение $\delta\rho_{LS}$ авторы [5] объясняют неудачным выбором образцов и связанными с этим дополнительными погрешностями измерений.

Расчет плотности жидкого сплава Inconel 718 ρ_m проводился по относительному варианту гамма-метода [7, 10]:

$$\rho_m(T) = \rho_m(T_L) \cdot \left\{ \frac{\ln[J_0(T)/J(T)]}{\ln[J_0(T_L)/J_L]} \right\} \cdot \left\{ \frac{1 + \bar{\alpha}_g(T_L) \cdot (T_L - T_f)}{1 + \bar{\alpha}_g(T) \cdot (T - T_f)} \right\}.$$

Таблица

Термические свойства сплава Inconel 718

Фаза		T, K	$\alpha, 10^{-6} K^{-1}$	$\beta, 10^{-5} K^{-1}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\varphi(\alpha, \beta)^*, \%$	$\varphi(\rho)^*, \%$
Твердая	T_C	293,15	13,3	4,0	8170	1,3	0,05
		300	13,4	4,0	8168	1,2	0,05
		350	13,7	4,1	8151	1,2	0,05
		400	14,1	4,2	8134	1,1	0,05
		450	14,4	4,3	8117	1,1	0,05
		500	14,7	4,4	8099	1,0	0,05
		550	15,0	4,5	8081	1,0	0,05
		600	15,3	4,6	8063	0,9	0,05
		650	15,5	4,6	8044	1,0	0,05
		700	15,7	4,7	8026	1,1	0,05
		750	15,9	4,7	8007	1,2	0,05
		760	15,9	4,8	8003	1,3	0,05
		1180	21,1	6,2	7792	1,3	0,06
		1200	21,2	6,3	7782	1,2	0,06
		1250	21,6	6,4	7758	1,1	0,07
		1300	21,9	6,4	7733	1,0	0,07
		1350	22,2	6,5	7708	0,9	0,07
		1400	22,5	6,6	7682	0,8	0,07
		1450	22,8	6,7	7657	0,9	0,07
		1500	23,2	6,8	7631	1,0	0,07
	T_S	1532	23,4	6,8	7615	1,0	0,07
Жидкая	T_L	1608	—	8,3	7378	8,0	0,21
		1650	—	8,3	7353	8,0	0,24
		1700	—	8,3	7322	8,0	0,28
		1731	—	8,3	7304	8,0	0,30

* $\varphi(x)$ — относительная погрешность величины x ; доверительная вероятность 95 %.

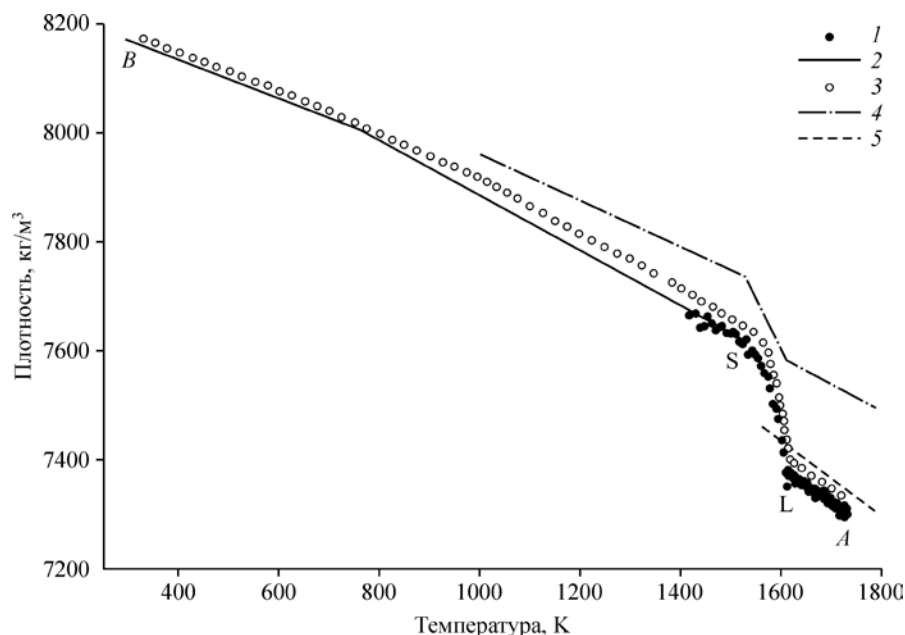


Рис. Температурная зависимость плотности сплава Inconel 718 в твердом (BS) и жидком (LA) состояниях.

1, 2 — результаты настоящей работы, полученные гамма-методом и дилатометрическим методом соответственно; 3 — дилатометрический метод [4], 4 — метод импульсного нагрева [5], 5 — метод левитирующей капли [6].

Значение опорной плотности $\rho_m(T_L) = (7378 \pm 16) \text{ кг/м}^3$ было найдено с использованием полученных в настоящей работе величин $\rho_c(T_S)$ и $\delta\rho_{LS}$. Экспериментальные данные по плотности жидкого образца аппроксимировались линейной температурной зависимостью

$$\rho_m(T) = 7378 - 0,609 \cdot (T - 1608), \text{ кг/м}^3; \quad 1608 \text{ K} \leq T \leq 1731 \text{ K}.$$

В таблице отображены сглаженные температурные зависимости плотности, ЛКТР и объемного коэффициента теплового расширения $\beta = -(d\rho/dT)/\rho$ сплава Inconel 718 в твердом и жидком состояниях, согласованные между собой. На рисунке приведено сравнение полученных в представленной работе результатов по плотности твердого и жидкого сплава Inconel 718 с литературными данными. Значения плотности, измеренные в работе [5] методом импульсного нагрева, существенно превышают данные остальных работ, что неудивительно, поскольку этот метод имеет относительно низкую точность. Результаты исследований [4, 6] и настоящей работы согласуются в пределах суммарной погрешности измерений. Отметим, однако, что гамма-метод, в отличие от других методик, дает возможность измерять относительные объемные изменения без привлечения данных о массе, плотности и геометрических размерах образца, в связи с чем исключается влияние ряда систематических погрешностей на точность определения величин $\delta\rho_{LS}$ и β [10]. Это позволяет утверждать, что полученные в представленной работе значения относительного скачка плотности при плавлении и объемного коэффициента теплового расширения жидкого сплава Inconel 718 являются наиболее надежными.

Список литературы

1. Kundin J., Mushongera L., Emmerich H. Phase-field modeling of microstructure formation during rapid solidification in Inconel 718 superalloy // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 95. P. 343–356.
2. Amato K.N., Gaytan S.M., Murr L.E., Martinez E., Shindo P.W., Hernandez J., Collins S., Medina F. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting // *Acta Materialia*. 2012. Vol. 60, No. 5. P. 2229–2239.
3. Wang Z., Guan K., Gao M., Li X., Chen X., Zeng X. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting // *J. Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 513. P. 518–523.
4. Blumm J., Henderson J.B. Measurement of the volumetric expansion and bulk density of metals in the solid and molten regions // *High Temperatures — High Pressures*. 2000. Vol. 32, No. 1. P. 109–114.
5. Pottlacher G., Hosaeus H., Kaschnitz E., Seifert A. Thermophysical properties of solid and liquid Inconel 718 Alloy // *Scandinavian J. Metallurgy*. 2002. Vol. 31, No. 3. P. 161–168.
6. Wang H.P., Zheng C.H., Zou P.F., Yang S.J., Hu L., Wei B. Density determination and simulation of Inconel 718 alloy at normal and metastable liquid states // *J. Materials Sci. & Technology*. 2018. Vol. 34, No. 3. P. 436–439.
7. Abdullaev R.N., Kozlovskii Yu.M., Khairulin R.A., Stankus S.V. Density and thermal expansion of high purity nickel over the temperature range from 150 K to 2030 K // *Int. J. Thermophysics*. 2015. Vol. 36, No. 4. P. 603–619.
8. Babu V.S., Pavlovic A.S., Seehra M.S. Oxidation characteristics and thermal expansion of Inconel alloy 718 from 300 K to 1273 K // *Proc. of the int. Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives*. The Minerals, Metals & Materials Society. Pittsburgh, USA. 1997. P. 689–693.
9. Станкус С.В., Хайрулин Р.А. Измерение термических свойств платины в интервале температур 293–2300 K методом проникающего излучения // *Теплофизика высоких температур*. 1992. Т. 30, № 3. С. 487–494.
10. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Попель П.С. Методика экспериментального определения плотности твердых и жидких материалов гамма-методом. Методика ГСССД МЭ 206–2013. М.: Стандартиформ, 2013. 54 с.

Статья поступила в редакцию 9 апреля 2019 г.,
после доработки — 9 апреля 2019 г.,
принята к публикации 26 апреля 2019 г.