

УДК 536.2.023:536.212.2

Коэффициенты переноса тепла сплава Inconel 617*

А.Ш. Агажанов, Д.А. Самошкин, Ю.М. Козловский

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

E-mail: scousekz@gmail.com

В настоящей работе исследованы температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) одного из наиболее перспективных жаропрочных никелевых сплавов Inconel 617. Измерения проводились в диапазоне температур от 300 до 1475 К методом лазерной вспышки на установке LFA-427. Оцениваемые погрешности полученных данных в зависимости от температуры составили 2–4 и 3–5 % для a и λ соответственно. Проведено сопоставление с известными литературными данными. Получены аппроксимирующие уравнения температурных зависимостей изученных свойств, и составлена таблица справочных значений, которые могут быть использованы в различных инженерных и научных задачах.

Ключевые слова: никелевый сплав Inconel 617, температуропроводность, теплопроводность, метод лазерной вспышки.

В последние годы особое внимание уделяется разработке и применению никелевых жаропрочных суперсплавов в различных областях промышленности. Одним из таких сплавов является Inconel 617 (Ni-22Cr-12Co-9Mo) [1–4], обладающий высокой стойкостью к окислительным процессам при высоких температурах, прочностью и устойчивостью к коррозионным образованиям. Сплав нейтрален к воздействию большого количества химических реагентов, хорошо поддается обработке и сварке. В связи с этим Inconel 617 в качестве конструкционного материала имеет широкий спектр применения: от элементов камер сгорания газовых турбин до узлов установок для переработки кислот и гелиевых теплообменников в высокотемпературных ядерных реакторах. Однако стоит отметить, что транспортные свойства сплава, в частности, теплопроводность (λ) и температуропроводность (a), в настоящее время исследованы недостаточно подробно. В литературе представлено несколько экспериментальных работ [5–7] по измерению λ и a , результаты которых различаются между собой при высоких температурах и выходят за пределы суммарных погрешностей измерений. Температурное поведение теплофизических свойств большинства никелевых сплавов при высоких температурах, особенно в области структурных фазовых превращений, решающим образом зависит от исходной микроструктуры и состава сплава, а также от термической стабильности различных выделившихся фаз [7]. При этом в работе [6] было установлено, что старение сплава путем

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800219-2).

термической обработки не оказывало значительного влияния на его теплофизические свойства. Наличие надежных данных по коэффициентам переноса тепла конструкционных материалов, подобных Inconel 617, необходимо, прежде всего, для проведения теплотехнических расчетов режимов работ для промышленных теплообменных агрегатов как в области их рабочих температур (900–1200 К), так и при экстремально высоких температурах — выше 1200 К. Таким образом, вполне очевидно, что высокоточное экспериментальное исследование теплопроводности и температуропроводности Inconel 617 в широком диапазоне температур является актуальной задачей в области материаловедения суперсплавов.

В представленной работе измерение температуропроводности сплава проводилось методом лазерной вспышки [8] на уникальном экспериментальном стенде LFA-427 фирмы NETZSCH. Образец имел форму цилиндра диаметром 12,6 мм и толщиной 2,4 мм с плоскопараллельными шлифованными торцами. Эксперименты проводились в статической инертной атмосфере (Ar 99,992 об. %) в интервале температур 300–1475 К. В процессе измерения нижняя поверхность цилиндрического образца облучалась коротким лазерным импульсом (1,064 мкм) от Nd: YAG-лазера длительностью 0,8 мс с энергией до 10 Дж. Изменение температуры верхней поверхности регистрировалось ИК-детектором, охлаждаемым жидким азотом. Величина температуропроводности a определялась по полученной термограмме разогрева верхней поверхности образца с учетом тепловых потерь в виде излучения по расчетной модели, приведенной в работе [9]. Вводилась поправка на конечную длительность лазерного импульса и его реальную форму [10]. Для учета теплового расширения Inconel 617 использовались значения относительного удлинения ε из [11]. Измерения a при заданной температуре осуществлялись после термостатирования образца в серии из нескольких «выстрелов» лазера. Общая погрешность определения a составляет 2 % при 300 К и 4 % при 1500 К, что было установлено по результатам измерений со стандартными твердыми образцами из высокочистых меди и молибдена.

Теплопроводность λ сплава рассчитывалась по формуле

$$\lambda = a \rho c_p, \quad (1)$$

где ρ — плотность, c_p — удельная массовая теплоемкость. Величина $\rho(T)$ при заданной температуре находилась по значению плотности сплава при комнатной температуре ρ_0 и с помощью литературных данных по $\varepsilon(T)$ [11] по соотношению

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{(1 + \varepsilon(T))^3}. \quad (2)$$

Величина ρ_0 определялась по результатам измерения массы и геометрических размеров образца Inconel 617 с погрешностью не более 0,5 % и составила $\rho_0 = 8,262 \text{ г/см}^3$. Данные по c_p взяты из [12], в котором теплоемкость сплава измерялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии с неопределенностью 2–4 %. Погрешность рассчитанных значений λ с учетом неопределенностей ρ и c_p оценивается в 3–5 % в зависимости от температуры.

На рис. 1 представлены результаты по температуропроводности сплава Inconel 617, полученные в трех последовательных термических циклах нагрева–охлаждения в интервале температур 300–1475 К. Как видно из графика, результаты всех трех экспериментов согласуются в пределах погрешности измерения величины a , а на полученной температурной зависимости $a(T)$ отчетливо наблюдается излом кривой в интервале 1015–1076 К,

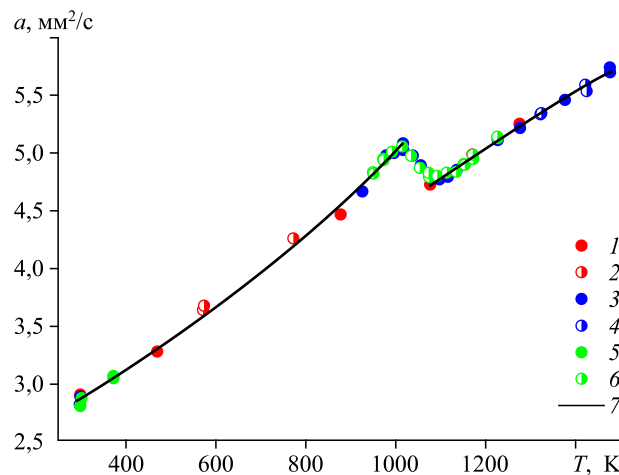


Рис. 1. Температуропроводность сплава Inconel 617.

Данные по нагреву и охлаждению соответственно
в первом (1, 2), втором (3, 4) и третьем (5, 6) экспериментах;
7 — аппроксимация по уравнениям (3) и (4).

свидетельствующий о фазовом превращении в сплаве. Согласно термическому анализу Inconel 617 [7], данная аномалия по температурам соответствует процессу растворения карбида вида $M_{23}C_6$, где M — Cr, Fe или Mo. Похожая аномалия наблюдалась и на кривой $a(T)$ у другого суперсплава — Inconel 718 [13]. Аппроксимация данных по трем измерениям методом наименьших квадратов дала следующие уравнения:

$$a(T) = 2,280 + 1,642 \cdot 10^{-3} T + 1,1 \cdot 10^{-6} T^2, \quad 300 \leq T \leq 1015 \text{ K}, \quad (3)$$

$$a(T) = 1,358 + 3,610 \cdot 10^{-3} T - 4,5 \cdot 10^{-7} T^2, \quad 1076 \leq T \leq 1475 \text{ K}, \quad (4)$$

где a измеряется в $\text{мм}^2/\text{с}$. Среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек от уравнений (3) и (4) не превышают 1,1 и 0,4 % соответственно. Таким образом, как показали эксперименты по a , вне области указанного фазового превращения изменение температуропроводности носит монотонный характер и хорошо воспроизводится в циклах нагрева — охлаждения (рис. 1).

На рис. 2 представлено сравнение результатов по a настоящей работы и литературных данных [6, 7], в которых также реализовывался метод лазерной вспышки. В работе [6] исследовались четыре сплава разных производителей с разным составом и термической обработкой, при этом данные по a для всех четырех образцов воспроизвелись в пределах 3 % на всем исследованном интервале до 1273 К. На графике для сравнения представлены результаты [6] для образца, изготовленного путем наплавления металла из сварочной проволоки. В работе [7] образец Inconel 617 предварительно закалялся водой с температурой 1473 К, после чего подвергался старению при 973 К в течение 1000 ч в потоке высокочистого аргона с целью формирования в структуре сплава различных мелкодисперсных фаз, а в настоящей работе исследуемый сплав отжигался в статической атмосфере аргона в течение первого нагрева до 1273 К (рис. 1). Как видно по графику (рис. 2), полученные авторами результаты согласуются с данными работы [6] в пределах погрешности измерений на всем интервале измерений, однако по сравнению с данными работы [7] хорошее согласование наблюдается лишь в интервале до 900 К, выше этой температуры значения, приведенные из исследования [7], лежат заметно ниже точек из настоящей работы, а кривая $a(T)$ из [7] имеет более сложное поведение.

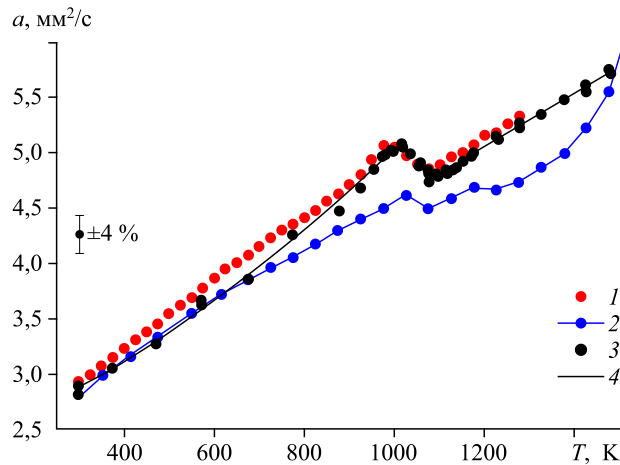


Рис. 2. Температуропроводность сплава Inconel 617.

Данные работ [6] (1), [7] (2) и настоящего исследования (3);
4 — аппроксимация по уравнениям (3) и (4).

Как на зависимости, полученной авторами, так и для данных [6] наблюдается только один заметный излом — в интервале 1015–1076 К, а на кривой $a(T)$ из [7] имеются два мелких излома — при температурах 1073 и 1223 К, которые, согласно [7], обусловлены растворением упорядоченных фаз $M_{23}C_6$ и $Ni_3(Al, Ti)$. Растворение этих фаз, по мнению авторов [7], вызывает разупорядочение в матричной фазе. Это приводит к снижению подвижности атомов с повышением температуры, что, собственно, и проявляется в виде изломов на температурных зависимостях $a(T)$.

На рис. 3 представлены результаты расчета теплопроводности Inconel 617 по формуле (1) и литературные данные [5–7]. Следует отметить, что на температурной зависимости теплоемкости из работы [12], используемой для расчета λ в настоящей работе, наблюдался скачок в интервале температур 790 ÷ 900 К, обусловленный фазовым превращением. Величина теплоемкости сплава в работе [12] не определялась в этой области, поскольку измеряемая c_p отражала как собственную теплоемкость фаз, так и теплоту фазового превращения. Поэтому в представленной работе величина λ определялась только

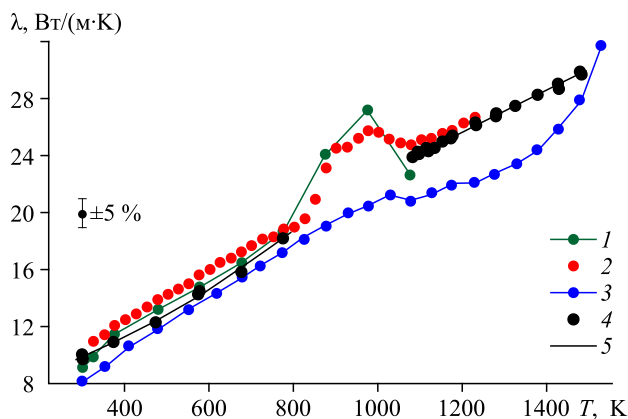


Рис. 3. Теплопроводность сплава Inconel 617.

Данные работ [5] (1), [6] (2), [7] (3) и настоящего исследования (4);
5 — аппроксимация по уравнениям (5) и (6).

в интервалах температур до 790 К и после 1076 К, в которых температурные зависимости $a(T)$ и $c_p(T)$ изменялись монотонно. Как видно из графика, в области температур до 800 К результаты настоящей работы согласуются со всеми литературными данными [5–7] в пределах суммарных погрешностей определения λ , а выше области аномального изменения λ они хорошо согласуются с данными [6]. Зависимость $\lambda(T)$ из [7] при высоких температурах лежит существенно ниже точек настоящего исследования, максимальное отличие составляет примерно 17 %, а вблизи температуры 1475 К она пересекает кривую, полученную авторами. В работе [5] сплав, предварительно отожженный при 1450 К на воздухе, подвергался испытанию на термическую усталость, которое включало циклический нагрев и охлаждение, а также имитацию процессов тиксоформирования сталей. Тем не менее, как видно из графика, полученные в [5] данные по λ хорошо коррелируют со всеми остальными данными, включая результаты настоящей работы.

Аппроксимация рассчитанных данных по λ сплава методом наименьших квадратов дала следующие уравнения:

$$\lambda(T) = 6,922 + 7,623 \cdot 10^{-3} T + 9,0 \cdot 10^{-6} T^2, \quad 300 \leq T \leq 790 \text{ К}, \quad (5)$$

$$\lambda(T) = 5,098 + 1,965 \cdot 10^{-2} T - 2,0 \cdot 10^{-6} T^2, \quad 1076 \leq T \leq 1475 \text{ К}, \quad (6)$$

где λ измеряется в Вт/(м·К). Среднеквадратичные отклонения рассчитанных точек от уравнений (5) и (6) не превышают 1,1 и 0,4 % соответственно.

В таблице приведены рекомендуемые значения по a и λ для сплава Inconel 617, полученные на основании уравнений (3)–(6), и их оцениваемые погрешности определения — δa и $\delta \lambda$.

Таким образом, получены новые экспериментальные данные по температуропроводности и теплопроводности суперсплава Inconel 617 в интервале температур 300–1475 К с оцениваемыми погрешностями 2–4 и 3–5 %. Показано, что на большем участке температур кривые исследованных свойств $a(T)$ и $\lambda(T)$ имеют слабо нелинейные зависимости, а на кривой $a(T)$ наблюдается отчетливый излом в области 1015–1076 К, обусловленный фазовым превращением. Сравнение с имеющимися литературными данными подтверждает достоверность измеренных значений по a и λ .

Таблица
Рекомендуемые данные по теплопроводности и температуропроводности
сплава Inconel 617 и их оцениваемые погрешности

$T, \text{ К}$	$a, \text{ мм}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\delta a, \%$	$\delta \lambda, \%$
300	2,87	10,02	2,0	3,0
400	3,11	11,41	2,1	3,1
500	3,38	12,98	2,2	3,2
600	3,66	14,73	2,3	3,3
700	3,97	16,67	2,4	3,4
790	4,30	18,56	2,5	3,5
900	4,65	—	2,6	—
1000	5,02	—	2,7	—
1015	5,08	—	2,7	—
1076	4,72	23,92	2,8	3,8
1100	4,78	24,29	2,8	3,8
1200	5,04	25,79	2,9	3,9
1300	5,29	27,25	3,0	4,0
1400	5,53	28,68	3,5	4,5
1475	5,70	29,72	4,0	5,0

Список литературы

1. Guo Y., Wang B., Hou S. Aging precipitation behavior and mechanical properties of Inconel 617 superalloy // Acta Metall. Sinica. Engl. Letters. 2013. Vol. 26, No. 3. P. 307–312.
2. El-Awadi G.A., Abdel-Samad S., Elshazly E.S. Hot corrosion behavior of Ni based Inconel 617 and Inconel 738 superalloys // Appl. Surf. Sci. 2016. Vol. 378. P. 224–230.
3. Jo T.S., Kim S.H., Kim D.G., Park J.Y., Kim Y.D. Thermal degradation behavior of Inconel 617 alloy // Metals and Materials. Inttrn. 2008. Vol. 14, No. 6. P. 739–743.
4. Birol Y. High temperature sliding wear behaviour of Inconel 617 and Stellite 6 alloys // Wear. 2010. Vol. 269, No. 9–10. P. 664–671.
5. Birol Y. Thermal fatigue testing of Inconel 617 and Stellite 6 alloys as potential tooling materials for thixoforming of steels // J. Materials Sci. Eng. A. 2010. Vol. 527, No. 7–8. P. 1938–1945.
6. Rabin B.H., Swank W.D., Wright R.N. Thermophysical Properties of Alloy 617 from 25 °C to 1000 °C // Nuclear Engng Design. 2013. Vol. 262. P. 72–80.
7. Rai A.K., Trpathy H., Hajra R.N., Raju S., Saroja S. Thermophysical properties of Ni based super alloy 617 // J. Alloys Compounds. 2017. Vol. 698. P. 442–450.
8. Agazhanov A.Sh., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., Stankus S.V. Thermal conductivity and thermal diffusivity of Li-Pb eutectic in the temperature range of 293–1273 K // Fusion Engng Design. 2020. Vol. 152, No. 111456. P. 1–5.
9. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34, No. 7. P. 1909–1913.
10. Blumm J., Opfermann J. Improvement of the mathematical modeling of flash measurement // High Temp. — High Press. 2002. Vol. 34, No. 5. P. 515–521.
11. Kozlovskii Yu.M., Stankus S.V. The linear thermal expansion coefficient of Inconel 617 alloy // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2119. P. 012136-1–012136-4.
12. Samoshkin D.A., Agazhanov A.Sh., Stankus S.V. Heat capacity of Inconel 617 alloy // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2119. P. 012138-1–012138-5.
13. Agazhanov A.Sh., Samoshkin D.A., Klovskii Yu.M. Thermophysical properties of Inconel 718 alloy // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1382. P. 012175-1–012175-5.

*Статья поступила в редакцию 10 июня 2022 г.,
после доработки — 16 июня 2022 г.,
принята к публикации 17 июня 2022 г.*