

УДК 621.791.01

Б.П. Конищев¹, К.Б. Конищев²**РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СТАЛЕЙ
ПО ИХ ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва²

Приводятся расчеты теплофизических коэффициентов теплопроводности, объемной теплоемкости, температуропроводности, поверхностной теплоотдачи, температуры ликвидус сталей, температурной зависимости теплофизических свойств удельного электросопротивления цветных металлов, полученные в результате линейной корреляции экспериментальных величин.

Ключевые слова: теплофизические коэффициенты, теплопроводность, объемная теплоёмкость, температуропроводность, поверхностная теплоотдача, температура ликвидус, удельное электросопротивление.

Быстрое развитие науки и техники последних десятилетий сопровождается постоянным и значительным ростом числа проблем, решение которых включает подробные исследования тепловых процессов при сварке. Наука о тепловых основах сварки рассматривает процессы распространения теплоты при нагреве металла различными источниками, влияние их на процессы плавления металла, а также на термический цикл и возникающие в шве и основном металле структурные и объёмные изменения.

Почти все существующие виды сварки основаны на местном концентрированном нагреве участков изделия до температур плавления или до пластичного состояния. Неправильный режим нагрева и охлаждения изделия в процессе сварки плавлением может стать причиной появления таких опасных дефектов сварки, как трещины, непровары, подрезы и др. Тепловое состояние металла, шлака и других компонентов, взаимодействующих в процессе образования сварного соединения, в значительной мере обуславливает характер, направление и скорость протекания всех физико-химических и металлургических процессов. Величина и характер деформаций и напряжений, возникающих в конструкциях при сварке, главным образом, зависит от цикла нагрева и охлаждения изделия, от характера температурных полей. Особенности распределения температур, скоростями отвода теплоты и охлаждения места сварки определяется структура металла шва и различных участков основного металла, прилегающих к шву. Кроме того, с тепловыми процессами связаны такие важнейшие характеристики сварки, как скорость нагрева металла, скорость расплавления, производительность сварки и её технико-экономическая эффективность.

Следовательно, без учёта теплового состояния металла нельзя достаточно глубоко объяснить большинство явлений, наблюдаемых при сварке. Чтобы определить характер протекания процессов сварки, необходимо знать распределение температур в теле и изменение его во времени в каждом отдельном случае. Поэтому, чтобы изучить сварочные процессы и научиться управлять ими, необходимо иметь представление о законах нагрева изделия и распространения в нём теплоты.

Для расчета температурных полей и температурных циклов сталей необходимо знание осредненных значений коэффициентов теплопроводности λ , объемной теплоемкости c и температуропроводности a (при температурах 500-600°C).

Для расчета тепловых процессов при сварке различных металлов принимаются осред-

ненные значения теплофизических коэффициентов: теплопроводности λ , объемной теплоемкости c , температуропроводности a , и полной поверхностной теплоотдачи α в диапазоне температур $T_{ср.}$, характерном для рассматриваемого процесса (табл. 1).

Таблица 1

Осредненные значения теплофизических коэффициентов

Металл	$T_{ср.}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/см К}$	$C\gamma, \text{Дж/см}^3\text{К}$	$a, \text{см}^2/\text{с}$	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$
НУ и НЛ сталь	600	0,38-0,42	4,8-5,2	0,07-0,09	1500
ВЛ сталь (X)	600	0,25-0,27	4,4-4,6	0,05-0,07	1450
ВЛ сталь (ХН)	550	0,21-0,25	4,6-4,8	0,04-0,06	1400
Медь	400	3,7-3,8	3,9-4,0	0,94-0,97	1080
Бронза	370	1,1-1,3	3,4-3,6	0,3-0,4	900
Латунь	400	0,9-1,1	3,6-3,8	0,25-0,35	1000
Алюминий	300	2,6-2,7	2,7	0,96-1	660
Алюминиевый сплав	280	1,3-1,4	2,7	0,48-0,52	650
Титановый сплав	700	0,16-0,18	3,5-3,6	0,04-0,06	1650

Примечание: НУ - низкоуглеродистые стали: СтЗсп, 22К, 20, 25 и др.;

НЛ - низколегированные стали: 15Х, 15ХМ, 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2С...;

ВЛ(Х) - высоколегированные хромистые стали: 08Х13, 12Х13, 20Х13, 08Х18Т, 15Х25Т...;

ВЛ(Х) - высоколегированные хромоникелевые стали: 12Х18Н9, 17Х18Н9, 08Х22Н6Т...;

медь – М0, М1, М2, М3 и др.; латунь – Л63, Л68, Л90, Л659-1 и др.; бронза – БрА7, БрМц5, БрАД9-4 и др.; алюминий – А99, А85, А8, А7, АД0 и др.; алюминиевые – сплавы АМг3, АМг4, АМг5, АМц, АД20, АД30 и др.; титановые сплавы – ВТ5, ВТ20, АТ2, АТ3, ТС5 и др.

Большая номенклатура существующих и новых марок сталей не позволяет учесть зависимость теплофизических коэффициентов от их химического состава, хотя для многих углеродистых и легированных сталей в литературе имеются значения этих коэффициентов при различных температурах. Анализ этих данных показал, что значения теплофизических коэффициентов находится в тесной корреляционной зависимости от суммарной атомной доли легирующих элементов в стали:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n C_i/m_i,$$

где i – номер легирующего элемента в стали; n – количество легирующих элементов, C_i – массовая доля i -го элемента в стали; m_i – атомная масса i -го элемента.

Математическая обработка табличных данных (около 90 составов углеродистых и легированных сталей) позволила установить корреляционные зависимости коэффициентов a и λ от суммарной доли σ при температурах 500-600 °С:

$$a = a_0 + a_1 a^x, \quad \lambda = b_0 + b_1 b^y, \quad c\gamma = c_0 + c_1 c^z,$$

где $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1$ - коэффициенты регрессии; x, y, z – показатели степени.

Рассчитанные по этим уравнениям значения коэффициентов α и λ в сравнении с их табличными (экспериментальными) значениями приведены в (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные и табличные значения коэффициентов λ и a

Сталь	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/смК}$		$a \cdot 10^3, \text{см}^2/\text{с}$	
	расчетное	табличное	расчетное	табличное
8	413	402	73	73
20	394	393	71	72
40	386	381	70	69
У8	363	352	69	64
У12	340	347	67	67
30Х	348	356	69	67
30Г2	364	372	70	69
12ХН3	317	314	71	72
30ХН3	298	308	66	63
10Х13	283	272	61	59
30Х13	276	272	60	58
20Х28	212	243	51	52
08Х18Н9	209	217	52	54
120Г13Л	214	205	49	40

Для конкретной марки стали осредненные значения теплофизических коэффициентов можно рассчитать в зависимости от содержания легирующих элементов по следующим уравнениям:

$$\sigma = \frac{1}{4} \left\{ \frac{1}{3} \left[C + \frac{1}{5} \left(Ni + Co + Cu + \frac{W}{3} \right) \right] + \frac{Mn}{14} + \frac{Si + Al}{7} + \frac{Cr + V + Ti}{13} + \frac{Mo + Nb + Zr}{24} \right\},$$

$$\lambda = \frac{1}{20} (11 - 7 \cdot \sqrt[4]{\sigma}), \quad c\gamma = \frac{1}{10} (55 - 9 \cdot \sqrt[4]{\sigma}), \quad a = \frac{\lambda}{c\gamma}.$$

Температура плавления сталей определяется температурой ликвидус $T_{л}$. Учитывая правило аддитивности влияния легирующих элементов на температуру ликвидус стали, можно получить следующую зависимость:

$$T_{л} = 5[4(77 - 3C) - Mn] - 0,5(13\sqrt{Cr} + 25\sqrt{Ni}) - 2(4Si + Mo + V + Co + Al + 3Cu + 7Ti + 9Nb) - 13Zr.$$

Если принять, что $T_{ср} \approx 0,4 \cdot T_{л}$, то коэффициент полной поверхностной теплоотдачи α можно рассчитать по уравнению

$$\alpha = \left(\frac{1}{37} + \frac{T_{л}}{28500} \right)^2.$$

Эти расчеты успешно используются студентами при выполнении курсовой работы по дисциплине «Физико-математические основы сварочных процессов». Например, для трубной стали 10Г2ФБЮ, содержащей 0,12% С, 1,75% Мn, 0,5% Si, 0,3% Cr, 0,3% Ni, 0,3% Cu, 0,12%

V, 0,05%Nb, 0,05%Al, 0,035% Ti, получены значения: $\lambda=0,365$ Вт/смК, $c\gamma=5,024$ Дж/см³К, $a=0,0726$ см²/с, $T_{л}=1506$ °С.

Важнейшими теплофизическими характеристиками, определяющими закономерность поведения цветных металлов при сварке, являются объемная теплоемкость $c\gamma$, теплопроводность λ , температуропроводность a , удельное электросопротивление ρ . Коэффициент теплопроводности λ определяет количество теплоты в Дж, которое проходит в 1 с через площадь поперечного сечения металла 1 см² при градиенте (перепаде температур) 1 К/см. Объемная теплоемкость $c\gamma$ определяет количество теплоты (Дж), которое необходимо для нагревания 1 см² металла на 1 К. Коэффициент температуропроводности a выражает скорость выравнивания

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$$

температуры и связан с предыдущими коэффициентами соотношением

Знание их температурной зависимости необходимо для решения задач, связанных с оптимизацией технологии сварки цветных металлов в микроэлектронике, ядерной энергетике и других современных отраслях промышленности.

Нелинейность температурной зависимости теплофизических коэффициентов учитывается только при численных методах расчета. Поэтому предпочтение следует отдать более простым линейным зависимостям, которые можно использовать не только при численных, но и при аналитических методах расчета. В табл. 3 представлены результаты математической обработки справочных данных по теплофизическим свойствам металлов, применяемых при сварке изделий электронной техники.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции и регрессии теплофизических коэффициентов цветных металлов

Металл ΔT , К	Коэффициенты	λ , Вт/смК	$c\gamma$, Дж/см ³ К	a , см ² /с	ρ , мкОм·см
1	2	3	4	5	6
Медь (300-1357)	b_0 $b \cdot 10^4$	4,249 -7,916	3,147 8,049	1,277 -3,947	-0,91 79,462
	r	-0,0998	0,97	0,997	0,998
Серебро (300-1235)	b_0 $b \cdot 10^4$	4,592 -8,082	2,291 4,952	1,936 -5,697	-0,741 72,473
	r	0,99	0,995	-0,997	0,998
Золото (300-1337)	b_0 $b \cdot 10^4$	3,338 -6,284	2,269 5,153	1,397 -4,096	-1,419 107,18
	r	0,992	0,942	0,999	0,997
Бериллий (300-1400)	b_0 $b \cdot 10^4$	1,997 -10,4	3,144 22,7	0,54 -3,55	-7,586 352,1
	r	-0,934	0,969	-0,876	0,9984
Магний (300-923)	b_0 $b \cdot 10^4$	1,635 -2,59	1,616 5,677	0,974 -3,579	-0,362 164,120
	r	-0,998	0,999	-0,999	0,999
Цинк (300-692)	b_0 $b \cdot 10^4$	1,259 -3,755	2,484 9,146	0,488 2,436	-1,914 253,41
	r	-0,993	9,946	-0,999	0,999
Алюминий (300-933)	b_0 $b \cdot 10^4$	2,885 -5,151	2,056 11,943	1,097 4,452	-1,077 122,47
	r	-0,965	0,997	-0,992	0,999
Олово (303-505)	b_0 $b \cdot 10^4$	0,735 -3,026	1,343 10,685	0,518 -3,96	-5,439 525,22

	r	-0,989	0,999	-0,996	0,999
Свинец	b_0	0,387	1,324	0,284	-5,531

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
(300-600)	$b \cdot 10^4$	1,184	4,148	1,387	887,5
	r	-0,999	0,998	-0,999	0,996
Гафний	b_0	23	1,73	12,6	-0,2
(300-1300)	$b \cdot 10^4$	-20	5,2	-28	127
	r	-0,794	0,998	-0,928	0,993
Вольфрам	b_0	1,7	2,3	0,68	-8,84
(300-1400)	$b \cdot 10^4$	-4,8	6	-2,5	344
	r	-0,943	0,978	-0,964	0,998
Палладий	b_0	0,67	2,7	0,24	6,5
(300-1400)	$b \cdot 10^4$	1,5	6	0,12	240
	r	0,992	0,983	0,992	0,992
Платина	b_0	0,64	2,7	0,24	1,9
(300-1400)	$b \cdot 10^4$	1,7	4,7	0,15	330
	r	0,96	0,999	0,673	0,998
Никель	b_0	1,17	2,2	0,14	-1,2
(300-430)	$b \cdot 10^4$	-9,3	53	-3,7	620
	r	0,996	0,949	-0,995	0,994
Никель	b_0	0,49	4,9	0,11	12,5
(630-1722)	$b \cdot 10^4$	1,8	0,58	0,32	28
	r	0,943	0,784	0,741	0,99

Во всех случаях использовалась линейная корреляция $K = b_0 + bT$, где T - температура; b_0 и b – коэффициенты регрессии; K - теплофизические коэффициенты (объемная теплоемкость c_v , теплопроводность λ , температуропроводность a , удельное электросопротивление ρ). Для оценки степени линейности полученной зависимости в таблице приводятся значения коэффициентов корреляции.

В широком диапазоне температур (от нормальной до плавления) получены наиболее высокие значения коэффициентов корреляции для непереходных металлов (медь, серебро, золото, магний, цинк, алюминий, олово, свинец), кроме бериллия. Эти металлы не имеют структурных и магнитных превращений в твердом состоянии, поэтому высокая линейность температурной зависимости теплофизических коэффициентов сохраняется до температуры плавления. Более высокая электро- и теплопроводность этих металлов по сравнению с другими обеспечивается их электронной составляющей (около 99%). Доли фоновой, магнитной и других составляющих в тепло- и электросопротивлении этих металлов незначительна.

Бериллий, в отличие от других непереходных металлов, имеет две кристаллические модификации (α , β). Сведения о свойствах бериллия, стабильного лишь в узком интервале ($T=1550$ К, $T=1560$ К), немногочисленны и противоречивы. Поэтому для бериллия получены линейные корреляционные зависимости лишь до температуры 1400 К.

В парамагнитных переходных металлах (гафний, вольфрам, палладий, платина) возрастает доля фоновой и магнитной составляющих и существенно нарушается линейность температурной зависимости теплофизических коэффициентов.

Для этих металлов удалось получить линейные температурные зависимости с высокими коэффициентами корреляции только до температур, значительно меньших, чем их температуры плавления (для гафния – до 1300 К, а для вольфрама, палладия и платины –

до 1400 К). Для более высоких температур также получены линейные зависимости, но с другими коэффициентами регрессии.

В ферромагнитных переходных металлах (никель, кобальт, железо) значительно возрастает доля магнитной составляющей. В точке Кюри наблюдается ярко выраженный максимум температурного коэффициента электросопротивления и объемной теплоемкости. Для теплопроводности этих металлов в точке Кюри имеется хорошо выраженный минимум. Поэтому линейные температурные зависимости теплофизических свойств никеля определялись для двух интервалов температур.

$$\begin{aligned} \Delta T &= 300 \dots 630 \text{ К}, & \Delta T &= 630 \dots 1728 \text{ К}, \\ \rho &= 1,2 + 6,2 \cdot 10^{-2} T, & \rho &= 12,5 + 2,8 \cdot 10^{-3} T, \\ \lambda &= 1,17 - 9,3 \cdot 10^{-4} T, & \lambda &= 0,49 + 1,8 \cdot 10^{-4} T, \\ a &= 0,34 + 3,7 \cdot 10^{-4} T, & a &= 0,11 + 3,2 \cdot 10^{-5} T, \\ c\gamma &= 2,2 + 5,3 \cdot 10^{-4} T & c\gamma &= 4,9 + 5,8 \cdot 10^{-5} T. \end{aligned}$$

Библиографический список

1. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. **Зиновьев, В.Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. изд. / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1980. – 384 с.
4. **Конищев, Б.П.** Расшифровка буквенных обозначений в маркировке сталей и сварочных материалов / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Проблемы сварки и прикладной электроники: материалы междунар. научно-технич. конф. «XI Бенардовские чтения» - Иваново: ИГЭУ, 2003. С 88–92.
5. **Конищев, Б.П.** Эпсилон-критерии для выбора расчетной схемы тепловых процессов сварки / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Сварка и контроль – 2004: сб. докл. Всероссийской с международным участием научно-технич. конф., посвященной 150-летию со дня рождения Н. Г. Славянова. – Пермь, 2004. Т. 2. С. 217–218.

Дата поступления
в редакцию 02.12.2013

В.Р. Konishchev¹, К.В. Konishchev²

CALCULATION OF STEEL THERMAL COEFFICIENTS ACCORDING TO THEIR CHEMICAL COMPOSITION AND THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE NON-FERROUS METAL THERMOPHYSICAL PROPERTIES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
«Gazprom VNIIGAZ LLC», Moscow²

Purpose: To find mathematical dependency of thermal coefficients from chemical composition of steel and thermal properties of non-ferrous metals.

Methodology: Mathematical calculation of shared data, linear correlation.

Findings: The result equations were used to calculate thermal cycles and temperature fields for welding.

Key words: thermal constant, thermal conductivity, volumetric heat capacity, thermal diffusivity, surface convective heat transfer, fusion temperature, specific electrical resistance.