

УДК 621.039.58

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ САВ-1 И АМГ-2 ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

*Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р., Байтелесов С.А., Болтабаев А.Ф., Кунгуров Ф.Р.,
Рахимов Э.Т., Салихбаев У.С. (ИЯФ АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан)*

В настоящее время в ядерных реакторах различного типа в качестве конструкционного материала широко используются алюминиевые сплавы, отличающиеся от других физико-механическими свойствами, в частности, прочностью, высокой пластичностью, устойчивостью к коррозии и большим запасом ползучести. АМГ-2 и САВ-1 относятся к группе алюминиевых деформируемых сплавов тройной системы Al—Mg—Si. Их физические свойства зависят в основном от соотношения концентрации в них алюминия и основных легирующих элементов — магния и кремния. Кроме того, в таких сплавах могут быть различные интерметаллические соединения, например, AlSiMnFe, AlSiFe, CuAl₂ и др. [1]. Высокая теплопроводность и слабая подверженность радиационному повреждению позволяют эксплуатировать конструкции на их основе при значительных тепловых нагрузках, в частности, изготавливать защитные оболочки твэлов и различные конструкции в активной зоне реакторов, работающих в широком диапазоне радиационных полей [2].

Все это обуславливает интерес к исследованию указанных материалов. Так, в работе [3] методом малоуглового рассеяния нейтронов исследована надатомная структура и показано, что в образцах сплава САВ-1 есть поры характерным радиусом 5—50 нм. Обнаружено, что облучение вызывает заметное уменьшение объемной доли крупных рассеивающих структур радиусом 40—50 нм и наряду с этим увеличение доли фракций радиусом менее 20 нм. Результаты нейтронных исследований коррелируют с механическими испытаниями облученных сплавов и изменением их элементного состава [4]. В то же время тепловые и электрические характеристики сплавов изучены недостаточно подробно. В работе [5] была исследована теплопроводность сплава САВ-1 и ее изменение с температурой. Однако из-за отсутствия данных об электропроводности вывод об относительном вкладе возможных механизмов передачи тепла в исследованной области температуры был оценочным. В связи с этим в настоящей работе для более пол-

ной характеристики физических свойств алюминиевых сплавов изучена зависимость как электропроводности, так и теплопроводности родственных сплавов САВ-1 и АМГ-2 от температуры.

Исследования проводили на образцах алюминиевых сплавов САВ-1 и АМГ-2 промышленных материалов, которые имели форму диска одинакового диаметра (15 мм) и разной высоты (2,35—3,53 мм). Плотность образцов, определенная по измерению массы и объема, составила 2,88 и 2,82 г/см³ для САВ-1 и АМГ-2 соответственно. Процентное отношение составляющих элементов в исследованных образцах анализировали с помощью рентгеновского микроанализатора «Jeol» JSM 5910 IV (Япония).

Коэффициент теплопроводности измеряли в диапазоне температуры 290—490 К на установке ИТ-λ-400 (Россия) методом динамического калориметра в режиме непрерывного постепенного нагрева и рассчитывали по соотношению [5, 6]

$$\lambda = n_l h K_T / [n_0 S (1 + \sigma_c)],$$

где n_l , n_0 — перепад температуры в стержне-тепломере и образце соответственно; h , S — высота и площадь поперечного сечения образца соответственно; K_T — теплопроводимость стержня-тепломера; σ_c — поправка на теплоемкость образца.

При определении теплопроводимости стержня-тепломера K_T в качестве образцовой меры теплопроводности использовали образец из чистой меди. В формуле не учитывается влияние удельного контактного теплового сопротивления R_k , относительный вклад которого в общее тепловое сопротивление образца и стержня-тепломера пренебрежимо мал. Коэффициент теплопроводности определяли с погрешностью не более 10%.

В том же диапазоне температуры было исследовано электросопротивление сплавов с помощью четырехзондового компенсационного метода. Исследования проводили в режиме нагрева и охлаждения через 50 К с выдерж-

кой 30 мин в каждой точке измерения. Температуру в измерительной камере поддерживали регулятором в пределах $\pm 0,5$ К и контролировали хромель-алюмелевой термопарой. Удельное электрическое сопротивление определяли по соотношению [7]

$$\rho = UR_{\text{эт}}S/U_{\text{эт}}L,$$

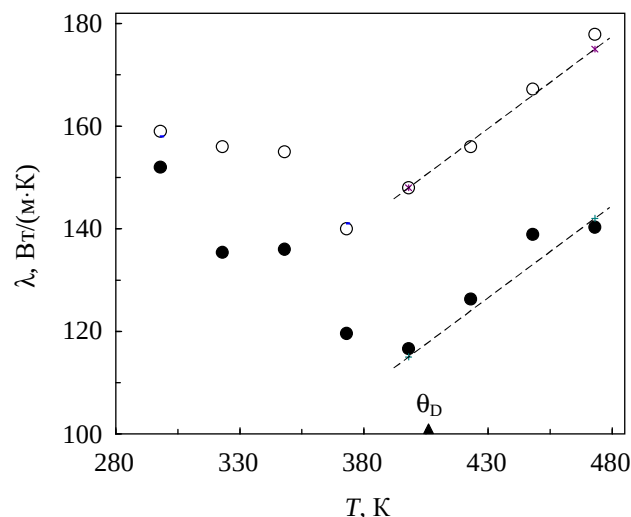
где U , $U_{\text{эт}}$ — падение напряжения на измеряемом и эталонном образце соответственно; $R_{\text{эт}} = 0,01$ Ом — сопротивление образцовой катушки; S , L — поперечное сечение и длина образца соответственно. Погрешность определения составляла примерно 1%.

Согласно рентгенографическому анализу сплавы САВ-1 и АМГ-2 имеют гранецентрированную кубическую структуру с параметром решетки $a = 0,4066$ и $0,4073$ нм соответственно. Таким образом, примеси обуславливают небольшое увеличение параметра решетки сплава по сравнению с эталонным образцом алюминия ($a = 0,4041$ нм). В таблице видно, что основными легирующими элементами сплавов являются кремний и магний. Доля остальных элементов составляла не более 0,6% по массе, за исключением железа в сплаве АМГ-2.

Массовая доля элементов в образцах САВ-1 и АМГ-2, %

Элемент	САВ-1	АМГ-2
Основные компоненты:		
Al	97,6	97,3
Mg	0,07	1,85
Si	2,09	0,10
Примеси, не более:		
Fe	0,05	0,24
Cu	0,03	0,06
Ni	0,04	0,06
Ti	0,02	0,06
B	0,01	0,01
Cd	0,01	0,02
Zn	0,03	0,04
Na	0,01	0,01

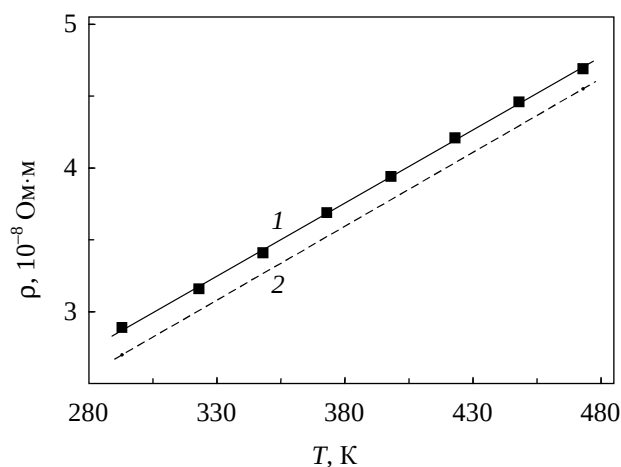
На рис. 1 видно, что в исследованном диапазоне температурная зависимость теплопроводности в образцах сплавов САВ-1 и АМГ-2 имеет одинаковый характер, проходя через минимум при температуре, близкой к характеристической температуре Дебая θ_D . При температуре выше температуры Дебая θ_D теплопроводность сплавов начинает возрастать прямо пропорционально температуре.



Р и с. 1. Зависимость теплопроводности сплава САВ-1 (○) и АМГ-2 (●) от температуры в предположении линейной зависимости (- -)

На рис. 2 приведена температурная зависимость удельного электрического сопротивления сплава САВ-1 и для сравнения аналогичная зависимость номинально чистого алюминия по результатам [8]. Видно, что в исследованном диапазоне наблюдается линейная зависимость, но имеется незначительное отличие как удельного сопротивления ($\sim 7\%$), так и температурного коэффициента сопротивления α ($\alpha_{\text{сав-1}} = 0,00346$, $\alpha_{\text{Al}} = 0,00380$).

Согласно квантовой теории основной причиной электрического сопротивления металлов является рассеяние свободных электронов (носителей) на дефектах решетки (в их числе тепловые колебания атомов), которые нарушают периодичность ее потенциала. В металлических сплавах, как и в металлах, концентрация носи-



Р и с. 2. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления сплава САВ-1 (1) и чистого алюминия (2)

телей не зависит от температуры. Поэтому температурная зависимость электропроводности сплавов должна определяться зависимостью подвижности носителей от температуры. В сплавах периодичность потенциала кристаллической решетки, нарушаемая тепловыми колебаниями, дополнительно нарушается беспорядочно распределенными атомами примесей. Это приводит к дополнительному рассеянию носителей заряда и уменьшению их подвижности. В результате удельное сопротивление сплава, как правило, выше удельного сопротивления составляющих его компонентов. При температуре, отличной от абсолютного нуля, к остаточному сопротивлению $\rho_{ост}$ добавляется тепловое сопротивление ρ_T , обусловленное рассеянием на тепловых колебаниях атомов решетки. Согласно известному правилу Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления [8] общее удельное сопротивление

$$\rho = \rho_{ост} + \rho_T. \quad (1)$$

Температурный коэффициент сопротивления α , как известно, выражает относительное изменение удельного сопротивления проводника ρ при его нагревании на 1 К. В первом приближении для чистых металлов $\rho = \rho_T$, и для температурного коэффициента сопротивления чистых металлов можно написать

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (2)$$

Для сплавов выражение (2) с учетом (1) можно преобразовать к виду

$$\alpha_{спл} = \frac{1}{\rho_{ост} + \rho_T} \frac{d\rho_T}{dT}. \quad (3)$$

Выражение (3) получено с учетом независимости остаточного сопротивления $\rho_{ост}$ от температуры. Видно, что температурный коэффициент сопротивления сплава должен быть меньше, чем чистого металла, причем тем меньше, чем больше остаточное сопротивление $\rho_{ост}$ отличается от тепловой составляющей ρ_T . В результате после преобразований получаем соотношение

$$\alpha_{спл} = \alpha / (1 + \rho_{ост}/\rho_T). \quad (4)$$

Рассчитанный по формуле (4) с учетом данных для чистого алюминия [6] температурный

коэффициент сопротивления для сплава САВ-1 равен 0,00354, что совпадает с экспериментальным $\alpha_{спл} = 0,00346$.

Для анализа экспериментальных данных была рассчитана характеристическая температура Дебая θ_D , разделяющая области высокой температуры ($T \gg \theta_D$), в которой колебания кристаллической решетки можно описывать классической теорией и низкой ($T \ll \theta_D$), где существенны квантово-механические эффекты, по формуле [9]

$$\theta_D = \frac{hu}{2\pi k} (6\pi^2 n)^{1/3},$$

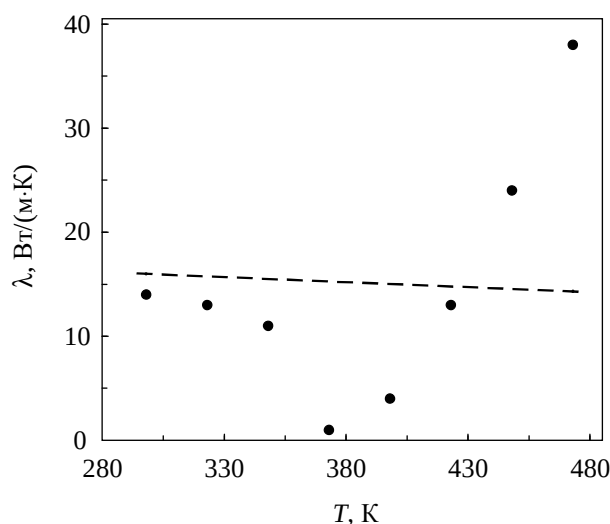
где h , k — постоянная Планка и Больцмана соответственно; u — средняя скорость звуковых волн, которая определяется через упругие модули; n — концентрация атомов. Для сплавов САВ-1 и АМГ-2 она оказалась почти одинаковой — 406 и 408 К соответственно. На рис. 1 видно, что коэффициент теплопроводности изменяется при температуре, близкой к температуре Дебая.

В металлах и сплавах возможны два основных механизма переноса тепла: упругие колебания решетки (фононы) и перенос свободными электронами. В соответствии с этим теплопроводность можно условно разбить на решеточную λ_p и электронную $\lambda_{эл}$ составляющие. При этом основная электронная составляющая теплопроводности подчиняется закону Видемана—Франца [10, 11]

$$\lambda_{эл} = LT/\rho,$$

где $L = (r + 5/2)(k/e)$ — число Лоренца; r — показатель степени в зависимости времени релаксации от энергии, который определяется механизмом рассеяния и степенью вырождения электронов проводимости; ρ — удельное сопротивление. При проявлении нескольких механизмов рассеяния электронов число Лоренца может стать функцией, определяющей зависимость теплопроводности от того или иного фактора.

Для исследованных образцов САВ-1 была рассчитана электронная теплопроводность $\lambda_{эл}$ с использованием для числа Лоренца значения, соответствующего механизмам рассеяния с параметром $r = -0,5$ (рассеяние на акустических фононах и близкодествующем потенциале примесей). Затем из экспериментальных данных



Р и с. 3. Зависимость от температуры решеточной (●) и электронной (---) составляющей теплопроводности сплава САВ-1 (электронная составляющая уменьшена в 10 раз)

для $\lambda(T)$ определена решеточная составляющая теплопроводности $\lambda_p(T)$. На рис. 3 видно, что решеточная составляющая теплопроводности $\lambda_p(T)$ имеет особенность в виде минимума в области температуры, близкой к температуре Дебая. Характер температурной зависимости электронной составляющей теплопроводности линейный.

Появление минимума на кривой решеточной теплопроводности указывает, вероятнее всего, на то, что число Лоренца при температуре ниже температуры Дебая меньше значений, соответствующих его механизмам с $r = -0,5$. Такой эффект наблюдался в твердых растворах на основе РbТе и связывался с неупругим рассеянием при межэлектронных столкновениях [12]. Было показано, что повышение температуры и соответствующее увеличение рассеяния электронов на примесях уменьшают вклад неупругого механизма рассеяния. Таким образом, вклад фононной составляющей теплопроводности становится заметным, когда с ростом температуры начинают возбуждаться сначала длинноволновые фононы, затем при приближении к температуре Дебая и коротковолновые акустические и оптические фононы. Одновременно монотонно уменьшается электронная составляющая теплопроводности за счет упругого взаимодействия электронов с длинноволновыми

фононами [12]. В результате при температуре выше температуры θ_D решеточная теплопроводность становится соизмеримой с электронной и факторы, влияющие на фононную теплопроводность, могут определять температурное поведение общей теплопроводности сплава САВ-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алюминиевые сплавы** (свойства, обработка, применение). Справочник. Под ред. Х. Нильсена. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. 680 с.
2. **Максимкин О.П., Яровчук А.В., Аулова Д.С. и др.** Коррозийная стойкость алюминиевого сплава САВ-1 после эксплуатации в активной зоне реактора ВВР-К и хранения в водном бассейне. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2010, № 5, с. 78—83.
3. **Лебедев В.М., Лебедев В.Т., Иванова И.Н. и др.** Структура алюминиевых сплавов, облученных нейтронами реактора. — ФТТ, 2010, т. 52, вып. 5, с. 934—936.
4. **Лебедев В.М., Лебедев В.Т., Орлов С.П. и др.** Исследование наноразмерной структуры сплава САВ-1, облученного быстрыми нейтронами до высоких флюенсов, методом малоуглового рассеяния нейтронов. — Там же, 2014, т. 56, вып. 1, с. 160—164.
5. **Абдукадырова И.Х., Аликулов Ш.А., Ахмеджанов Ф.Р. и др.** Теплопроводность алюминиевого сплава САВ-1 при высокой температуре. — Атомная энергия, 2014, т. 116, вып. 2, с. 78—82.
6. **Денисова Э.И., Шак А.В.** Измерение теплопроводности на измерителе ИТ-λ-400. Екатеринбург: Изд-во УТТУ, 2005. 35 с.
7. **Кунце Х.** Методы физических измерений. М.: Мир, 1989. 216 с.
8. **Королев А.П., Баршутин С.Н.** Материалы электроники и электротехники. Учебное пос. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. 80 с.
9. **Алерс Дж.** Использование измерений скорости звука для определения температуры Дебая. — В сб.: Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1968, т. 3Б, с. 13—61.
10. **Смирнов И.А., Тамарченко В.И.** Электронная теплопроводность в металлах и полупроводниках. Л.: Наука, 1977. 151 с.
11. **Могилевский Б.М., Чудновский А.Ф.** Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972. 536 с.
12. **Гуриева Е.А., Константинов П.П., Прокофьева Л.В. и др.** Теплопроводность легированных твердых растворов на основе РbТе с центральными примесями. — ФТП, 2006, т. 40, вып. 7, с. 783—787.

Поступила в Редакцию 12.05.14