

УДК 621.311.25(06)

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СПЛАВОВ Pb-Mg-Zr
И ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ
КОНТАКТА СПЛАВОВ И СТАЛИ ЭП-823
В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 300–900 °С**

А. Б. Круглов¹, В. Б. Круглов¹, П. Г. Стручалин¹,
В. С. Харитонов¹, Е. А. Орлова², С. А. Загребяев²,
В. Г. Жмурин²

В работе предложена методика измерения термического сопротивления границы контакта жидкий металл – конструкционная сталь. Приведены результаты измерений термического сопротивления границы контакта между сплавами Pb-Mg-Zr и сталью ЭП-823, а также теплопроводности сплавов Pb-Mg-Zr в диапазоне температур 350–900 °С.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоемкость, контактное термическое сопротивление, свинцовые сплавы, свинец–магний–цирконий.

В современных проектах перспективных ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах планируется использование нитридного топлива, существенными достоинствами которого являются высокая ураноемкость и теплопроводность. Предельная мощность твэлов с нитридным топливом ограничивается пороговой температурой в ~1200 °С [1], выше которой возможно сильное газовое распухание топлива. Снижение максимальной температуры топлива до 1000 °С при сохранении высокого энерговыделения требует использования теплопроводящего жидкометаллического слоя между топливом и оболочкой.

При исследовании твэла с нитридным топливом и свинцовым жидкометаллическим подслоем под облучением в реакторной установке БОР-60 [2] обнаружена проблема совместимости подслоя с оболочкой твэла из стали ЭП823-Ш (16Х12ВМСФБР). Коррозионное взаимодействие расплава с поверхностью отсутствует, если в качестве расплава

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: pstruchalin@mail.ru.

² ГНЦ РФ-ФЭИ им. А. И. Лейпунского, Калужская обл., г. Обнинск, Россия.

теплопроводящего слоя используется сплав свинца, легированного магнием и цирконием. При его использовании формируется защитное покрытие на поверхности стали из карбонитрида циркония и обеспечивается самозалечивание его случайных повреждений.

Анализ температурных режимов твэлов с нитридным топливом и жидкометаллическим подслоем требует наличия прецизионных данных по теплопроводности сплавов свинца с магнием и цирконием и данных по контактному термическому сопротивлению между расплавом и поверхностью стали. К настоящему времени такие данные отсутствуют. Экспериментальному исследованию теплопроводности сплавов свинца с магнием и цирконием (Pb–2.3% Mg, Pb–2.3% Mg-Zr, Pb–1.4% Mg) и контактного термического сопротивления посвящена настоящая работа.

Методика измерения теплопроводности и контактного сопротивления. Эксперименты проводились на установке LFA-457 импульсным методом в специальной ячейке. Ячейка представляет собой тигель, устанавливаемый в поворотный диск LFA-457, в тигле между плоскостью доньшка и плоскостью крышки находится исследуемый расплав [3]. При измерениях регистрируется термограмма нагрева поверхности крышки тигля после нагрева поверхности доньшка импульсом лазера. Полученная термограмма обрабатывается по методике, основанной на сравнении функций (1), построенных для начального участка (80–140 мс) экспериментальной и расчетной термограмм нагрева поверхности крышки.

$$Y(\tau) = \ln \left((T(\tau) - T(0)) \cdot \sqrt{\tau} \right) = C \cdot \tau^{-1} + b, \quad (1)$$

где $\tau = 0$ – момент прихода импульса.

В зависимости (1) коэффициент C при τ^{-1} не зависит от мощности импульса лазера, но зависит от термического сопротивления r_k на границе расплав-тигель и теплофизических свойств расплава. Таким образом, в экспериментах с $r_k \rightarrow 0$ ($r_k < 2 \cdot 10^{-6}$ (м²·К)/Вт) подгонкой угла наклона начального участка расчетной термограммы к углу наклона экспериментальной термограммы за счет варьирования теплопроводности, можно измерить теплопроводность расплава. Эксперименты показали, что добиться снижения контактного сопротивления ниже значений $2 \cdot 10^{-6}$ (м²·К)/Вт возможно при нагреве измерительной ячейки с расплавом до температур $\geq 800 - 900$ °С и выдержке в течение 30–60 минут. Тогда после охлаждения величина r_k остаётся малой.

При известной теплопроводности, а также плотности и теплоемкости расплава в диапазоне температур $T < 650$ °С, когда контактные сопротивления $r_k > 2 \times 10^{-6}$ (м²·К)/Вт, они определяются подгонкой угла наклона расчетной термограммы к экспериментальной варьированием величины r_k .

Результаты измерения теплопроводности и контактного термического сопротивления. Сплавы для исследования были подготовлены на экспериментальном участке АО “ГНЦ РФ–ФЭИ”. Исходными материалами для приготовления сплавов являлись: свинец марки С1, ГОСТ 3778-98; магний марки МГ-90, ГОСТ 804-93; цирконий марки Э110, ТУ 95.166-83.

На рис. 1 показаны результаты измерения теплопроводности сплава Pb–2.3% Mg-Zr.

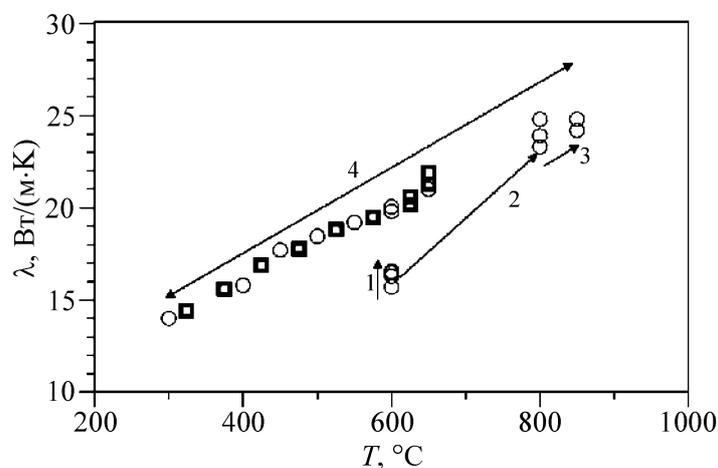


Рис. 1: Измерения теплопроводности сплава Pb–2.3% Mg-Zr после первого (○) и второго плавлений (□).

В контрольной точке при температуре 600 °С наблюдался уменьшающийся с течением времени рост измеренных значений теплопроводности, который объясняется уменьшением термического сопротивления r_k на границах контакта расплава и поверхностей ячейки. Было установлено, что время релаксации термического сопротивления уменьшается с ростом температуры. При нагреве до 800–900 °С релаксация термического сопротивления заканчивалась за время 20–30 минут.

В последующих циклах нагрева и охлаждения наблюдались воспроизводящиеся результаты измерения теплопроводности, что возможно только в случае, если контактные сопротивления остаются малы ($< 2 \cdot 10^{-6}$ (м²·К)/Вт) и не влияют на тепловой процесс в измерительной ячейке. Сформировавшийся после прогрева ячейки до 800–900 °С тепловой контакт уже не изменялся в диапазоне температур $T_{пл} < T_{изм} < 900$ и сохранялся

даже после кристаллизации и повторного плавления, что продемонстрировано на рис. 1, и кроме того, сохранялся с течением времени, что было установлено 10-ти часовым измерением теплопроводности расплава Pb–2.3% Mg–Zr при температуре 600 °С.

Отклонение теплопроводности от среднего значения (19.9 Вт/(м·К)) не превышало 5%. Можно полагать, что в экспериментах после установления хорошего теплового контакта не происходит изменения его качества и уменьшения эффективной теплопроводности расплава.

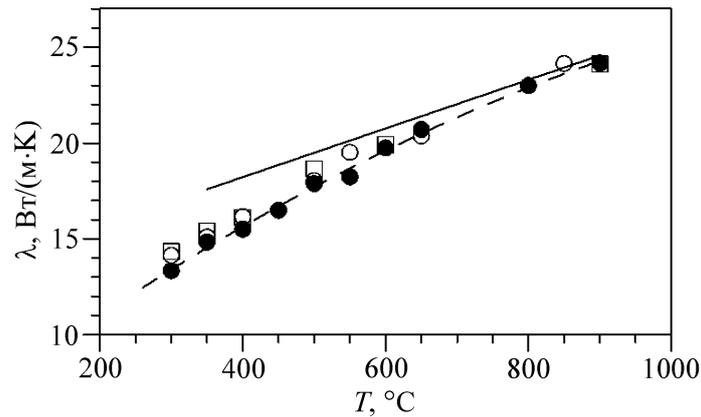


Рис. 2: Результаты измерения теплопроводности сплавов Pb-Mg-Zr: □ – Pb–2.3%Mg–Zr; ○ – Pb–1.4%Mg; ● – Pb–2.3%Mg; - - - аппроксимация теплопроводности сплавов Pb-Mg-Zr выражением (2); — — — теплопроводность свинца C1 [3].

На рис. 2 представлены результаты измерений теплопроводности сплавов свинца с магнием и цирконием. Полученные данные описываются интерполирующей зависимостью (2).

$$\lambda(T) = 5.66 + 0.028 \cdot T - 8.49 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (2)$$

Для проведенных измерений теплопроводности сплавов относительная погрешность не превысила величины 7%.

В экспериментах, выполненных в диапазоне $T_{\text{пл}} - 650$ °С, было установлено, что между расплавом и сталью существует термическое сопротивление, которое сопоставимо с термическим сопротивлением слоя расплава. Это значит, что в равенстве,

$$r_0 = \frac{\delta}{\lambda^*} = 2r_k + \frac{\delta}{\lambda_p}, \quad (3)$$

выражающем полное термическое сопротивление r_0 исследуемого расплава, заключенного между поверхностями ячейки, слагаемые – одного порядка. В выражении (3) δ – толщина слоя расплава, r_k – термическое сопротивление контакта расплава и материала ячейки, λ_p – теплопроводность расплава, λ^* – эффективная теплопроводность, определяющая общее термическое сопротивление зазора с учетом термического сопротивления границ контакта сплава и ячейки.

Измерения термического сопротивления проводились согласно изложенной методике при температурах до 650 °С.

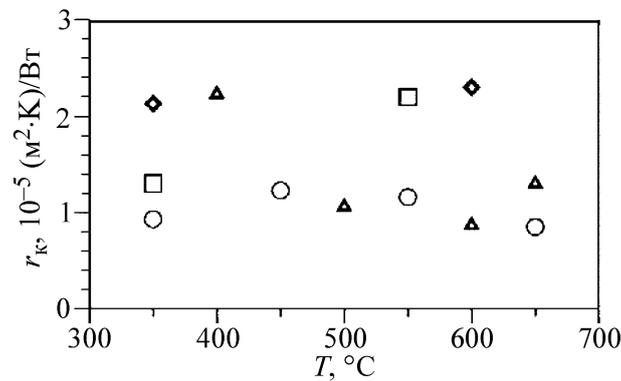


Рис. 3: Результаты измерений r_k контакта сталь ЭП-823 – сплав Pb-Mg-Zr: □, ○, △, ◇ – экспериментальные значения.

При нагреве до контрольной температуры 600 °С, как и ранее, наблюдалась релаксация термического сопротивления границы контакта, которое было рассчитано с использованием выражения (3) и выражалось в затухающем росте измеренных значений коэффициента теплопроводности. В отдельно проведенной серии было установлено, что этот рост практически прекращался по истечении 8-ми часов. При этом величина теплопроводности расплава оставалась ниже величины, рассчитанной с помощью выражения (2).

Результаты измерения термического сопротивления между расплавами Pb-Mg-Zr и сталью представлены на рис. 3. Среднее значение контактного сопротивления равно $1,5 \times 10^{-5}$ (м²·К)/Вт. Погрешность экспериментальных значений составляет 50%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16–19–10548).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Г. Самойлов и др., *Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов* (М., Энергоатомиздат, 1996).
- [2] А. В. Беляева, Ф. Н. Крюков, О. Н. Никитин и др., *Основные результаты исследований уран-плутониевого нитридного топлива после облучения в реакторе БОР-60*. Сб. докл. Междун. научн.-техн. конф. “Инновационные продукты и технологии ядерной энергетики”, Москва, 2012 г. (М., НИКИЭТ, 2012), с. 223-228.
- [3] A. V. Kruglov, V. B. Kruglov, V. I. Rachkov, et al., *High Temperature* **53**(4), 564 (2015).

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.