

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЗРЫВНЫХ КОМПАКТОВ МЕДЬ — МОЛИБДЕН

В. И. Мали, А. Н. Калинин*, С. А. Сергеев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

*Сибирский государственный НИИ метрологии, 630004 Новосибирск, kalinin@sniim.siberia.net

Впервые экспериментально определена теплопроводность взрывных компактов, полученных из смеси порошков меди и молибдена. Измерения проведены с помощью компаратора-измерителя теплопроводности КТ-6, разработанного в Сибирском государственном НИИ метрологии. Показано, что теплопроводность взрывных компактов зависит от содержания компонентов исходной смеси порошков и значительно возрастает после трехчасовой выдержки в вакуумной печи при температуре 900 °С. Разработан способ получения взрывным компактированием цилиндрических образцов диаметром 30 мм с однородными свойствами без особенности в центральной зоне.

Ключевые слова: взрывное компактирование смеси порошков медь — молибден, термообработка, двухточечное тепловое зондирование поверхности, волнообразование, трансформаторное железо.

В работах [1–3] проведены исследования эрозионной стойкости, электропроводности, микроструктуры и деформационных характеристик композитов, полученных при различных режимах взрывного компактирования смеси порошков меди и молибдена. Оказалось [3], что последующая термообработка таких компактов в вакуумной печи при температуре 900 °С в течение 0,5 ч достаточна для получения постоянного значения электропроводности, превышающего в несколько раз электропроводность взрывных компактов, не прошедших термообработку. В этом случае нет необходимости выбирать высокие значения скорости детонации взрывчатых веществ. В работах [3, 4] показано, что максимальная плотность образцов компактов цилиндрической формы достигается при определенных оптимальных значениях скорости детонации, что позволяет сделать выбор заряда взрывчатого вещества.

Поскольку исследуемые взрывные компакты предназначены для изготовления электротехнических изделий [1], представляло интерес исследовать их теплопроводность в зависимости от способов подготовки порошков, режимов их взрывного компактирования и последующей термообработки, что и было выполнено в настоящей работе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

В экспериментах использовали смеси порошков меди (размер частиц 10 ÷ 30 мкм) и

молибдена (размер частиц 5 ÷ 10 мкм) с различным массовым соотношением компонентов (от 0 до 100 %). Порошки смешивались в планетарной центробежной мельнице АГО-2У в стальных барабанах объемом 150 мл с помощью стальных шаров диаметром 5 мм. Ускорение мелющих тел составляло 600 м/с². Удельную массу шаров, скорость вращения и время помола (7 мин) сохраняли постоянными во всех экспериментах (кроме отдельных опытов с однокомпонентными порошками, содержащими 100 % меди или 100 % молибдена).

Компактирование проводили в стальных цилиндрических ампулах с наружным диаметром 59 мм, внутренним — 49 мм и длиной 250 мм (рис. 1). Поскольку для измерения теплопроводности требовались образцы толщиной не менее 10 мм, порошки с разным содержанием меди и молибдена загружали порциями высотой 12 мм и разделяли перегородками из трансформаторной стали толщиной 0,35 мм (химический состав стали, %: марганец — 0,44, медь — 0,17, никель — 0,11, хром — 0,11, кремний — 3,22, остальное — железо). Изготавливали не менее двух образцов компактов каждого состава. Исходная плотность смеси порошков 4,7 ÷ 5,0 г/см³. Ампулы размещали по оси цилиндрического (диаметром 100 мм) заряда взрывчатого вещества (аммонита 6 ЖВ), скорость детонации которого составляла 3,6 ÷ 3,8 км/с, плотность 0,9 г/см³.

После взрывной обработки часть сталь-

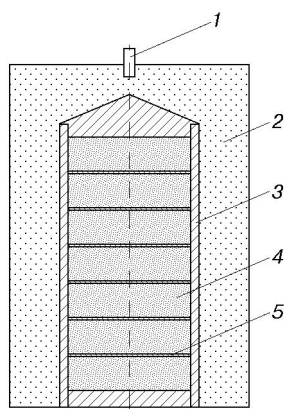


Рис. 1. Схема взрывного компактирования:
1 — детонатор, 2 — взрывчатое вещество, 3 — цилиндрическая стальная ампула, 4 — смесь порошков, 5 — стальные перегородки

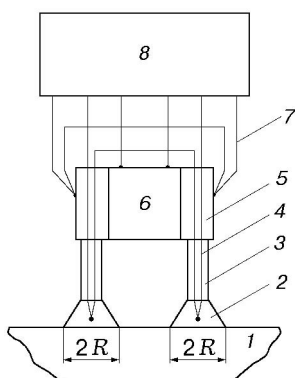


Рис. 2. Схема двухзондового метода измерения теплопроводности:

1 — исследуемый образец, 2 — изотермические наконечники, 3 — измерительные зонды, 4, 7 — дифференциальные термопары, 5 — изотермические пластины, 6 — полупроводниковая термобатарея (элемент Пельтье), 8 — блок регулирования и измерения разностей температур в точках расположения спаев термопар

ных ампул с находящимися внутри них компактами подвергали термообработке в вакуумной (0,6 Па) печи при температуре 1170 К с выдержкой в течение 3 ч и последующим охлаждением со скоростью 120 К/ч (вместе с печью). Для извлечения исследуемых цилиндрических образцов стенку и торцы ампулы ставивали. Торец, предназначенный для зондирования при измерении теплопроводности, шлифовали (высота элементов шероховатости приблизительно 1 мкм).

Теплопроводность определяли при комнатной температуре (≈ 293 К) с помощью

разработанного в Сибирском государственном НИИ метрологии компаратора-измерителя теплопроводности КТ-6 (метод двухточечного теплового зондирования поверхности исследуемого образца [5]). При измерении (рис. 2) два зонда приводили в контакт с поверхностью образца в пределах двух кругов радиуса R , определяемого размерами изотермических наконечников. Противоположные концы зондов закрепляли в изотермических пластинах, установленных на двух поверхностях полупроводниковой термобатарей элемента Пельтье, с помощью которого создавалась и поддерживалась разность температур. Дифференциальные термопары и блок 8, в цепь нагрузки которого включена термобатарея, служили для измерения и регулирования разностей температур на наконечниках и пластинах. Теплопроводность образца находили по отношению этих разностей температур или по отношению ЭДС термопар в установившемся тепловом режиме [6]. Шкалы прибора КТ-6 или его градуировочную характеристику определяли методом аппроксимации данных опытов на эталонных образцах из органического стекла, стекла ТФ-1 и К-8, плавленого кварца КВ, титанового сплава ВТ-6, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и низкоуглеродистой стали по ГОСТ 11036-76, аттестованных с помощью государственного эталона и имеющих теплопроводность соответственно 0,197; 0,700; 1,09; 1,34; 6,60; 14,6 и 64,0 Вт/(м·К) при температуре 293 К. Дополнительно в качестве эталонных использовали образцы из молибдена марки МЧВП и меди марки М2 с теплопроводностью соответственно 145 и 390 Вт/(м·К) [7, 8]. В качестве аппроксимирующей зависимости использовали функцию вида [5]

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{A_1}{A_2 + \lambda} + A_3,$$

где ΔT_1 и ΔT_2 — разности температур прилегающих соответственно к образцу и к термoeлектрической батарее изотермических элементов зондов; λ — искомая теплопроводность исследуемого (эталонного) образца; A_1 , A_2 , A_3 — постоянные, определяемые при аппроксимации, которые в общем случае зависят от геометрических, теплофизических параметров зондов и термического сопротивления контактов.

Метод показал высокую эффективность при определении теплопроводности широкого класса материалов и возможность проведения

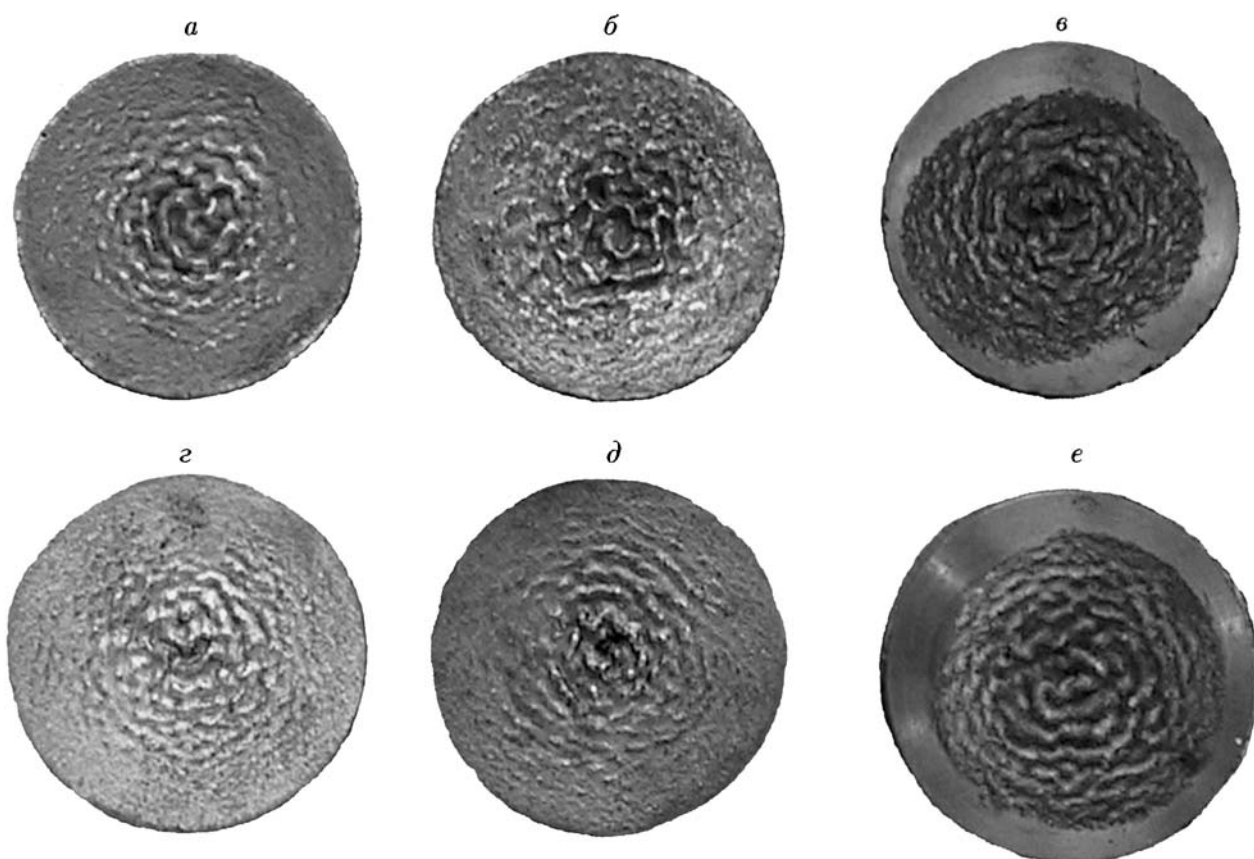


Рис. 3. Волнообразная деформация перегородок (*а, б, г, д*) и поверхности образцов (*в, е*)

экспресс-анализов. Наибольшая точность измерений метода зафиксирована в диапазоне $0,03 \div 15$ Вт/(м·К): случайная относительная погрешность измерений изменялась от 1 % при $\lambda \approx 1$ Вт/(м·К) до 3 % на краях диапазона. При более высоких значениях теплопроводности чувствительность метода снижается и сильнее проявляется отсутствие воспроизводимости термического сопротивления контактов зондов с образцом. Случайная погрешность при этом возрастает до 7 и 10 % при $\lambda = 100$ и 200 Вт/(м·К) соответственно. Для уменьшения случайной погрешности градуировку и измерения теплопроводности проводили многократно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Используемые размеры зондов и контактных наконечников прибора КТ-6 для измерения теплопроводности рассчитаны для образцов с минимальной толщиной 10 мм и с минимальным диаметром 30 мм. Получить та-

кие компакты достаточно однородными из двух порошков методом взрывного компактирования — весьма непростая задача, а судя по оценкам работы [9] — невыполнимая. Для решения этой задачи в настоящей работе для получения наибольшей плотности образцов исследуемых материалов использована найденная ранее [3] оптимальная скорость детонации, а в качестве материала для перегородок выбрана трансформаторная сталь.

При сжатии продуктами детонации стальной цилиндрической ампулы (см. рис. 1) внутри нее происходил сложный процесс взаимодействия ударных волн с пористыми и сплошными металлами. В результате взрывного компактирования ампула деформировалась (ее диаметр уменьшался). После удаления ампулы наблюдалась волнообразная (в виде концентрических окружностей, см. рис. 3) деформация перегородок и прилегающих к ним слоев порошка. Это явление заслуживает отдельного исследования и, по-видимому, связано с особенностями

ми деформирования трансформаторной стали. Подтверждением этому служат наши эксперименты с использованием перегородок из других материалов (сталь 30, нержавеющая сталь, медь, алюминий), в которых волнообразование не зарегистрировано и наблюдались отверстия в осевой зоне перегородок и цилиндрических компактах. Аналогичные отверстия и неоднородности в окрестности оси цилиндрических компактов отмечались многими исследователями (см., например, [10]).

В ходе работы было изготовлено более 50 образцов с различным содержанием меди и молибдена. Представленные на рис. 4, *a* результаты измерений теплопроводности на компактах, не подверженных термообработке, показывают слабую зависимость теплопроводности от объемного соотношения меди и молибдена. Это говорит о плохой адгезии компактируемых материалов, частицы которых приведены в соприкосновение примерно по одинаковой площади межчастичных контактов, играющих большую роль в теплопроводности, чем объемное содержание компонентов.

Результаты измерений теплопроводности взрывных медь-молибденовых компактов, подвергнутых термообработке, в зависимости от объемного соотношения компонентов приведены на рис. 4, *b*. Режим термообработки (1270 К в течение 3 ч в вакууме) выбирали с учетом результатов работы [3], в которой показано, что в таких условиях снимаются все внутренние напряжения и дальнейшее увеличение времени нагрева не приводит к росту электропроводности медь-молибденовых компактов. Экспериментальная кривая 2 на рис. 4, *b* проходит ниже кривой 1, рассчитанной по модели эффективной среды [11]. Причем если экспериментальные значения теплопроводности для молибденовых компактов составляют примерно 35 % от расчетных, то соответствующие данные для медных компактов гораздо больше — 75 %. Это говорит о том, что увеличению теплопроводности компактов, зажатых в стальной ампуле, способствуют два фактора: термообработка и дополнительное (в процессе термообработки) повышение давления из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения меди и стали, из которой выполнена ампула. Исследования шлифов с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов [3] показали, что наибольшую деформацию претерпевали частицы меди, которые мягче в

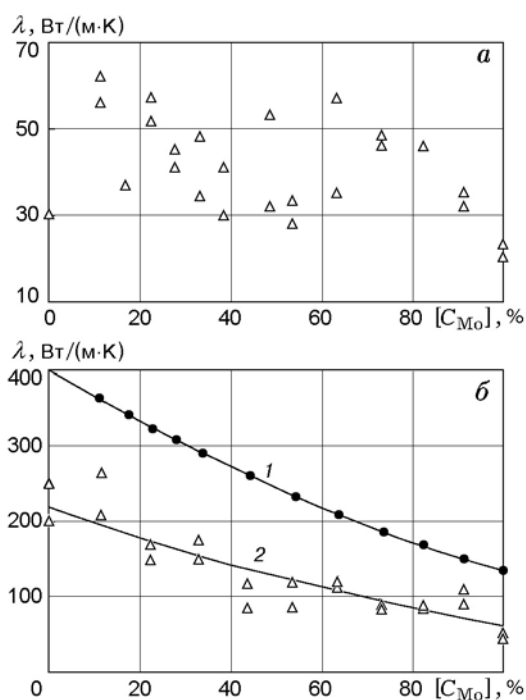


Рис. 4. Теплопроводность образцов без термообработки (*a*) и после термообработки (*b*):

1 — модель [11], 2 — эксперимент

исходном состоянии и обладают высокой текучестью при нагреве до температуры, близкой к температуре плавления. Аналогичный характер зависимости от содержания компонентов получен и для электропроводности взрывных медь-молибденовых компактов [2]. Поэтому теплопроводность исследуемых компактов, так же как и электропроводность, определяется, в основном, содержанием меди, которая играет решающую роль в создании межчастичных контактов.

Следует отметить, что к совершенно другим результатам привел нагрев взрывных компактов молибден — медь, предварительно извлеченных из стальных ампул, в условиях, аналогичных вышеописанным, где термообработку компактов проводили вместе с ампулами. Образцы компактов имели низкую прочность (крошились при механической обработке). Их теплопроводность практически не зависела от содержания компонентов смеси и составляла 35 % для молибденовых и 19 % для медных компактов от соответствующих расчетных величин.

Полученные результаты подтверждают аналогию [12] в поведении теплопроводности,

электропроводности и внутренних напряжений спрессованных металлических порошков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shvetsov G. A., Maly V. I., Solovov A. V., et al.** Erosion of explosively compacted Mo-Cu electrodes in high current arc discharges // IEEE Trans. on Magnetics. 1997. V. 33, N 1. P. 410–412.
2. **Shvetsov G. A., Maly V. I., Solovov A. V., et al.** New materials and technologies for pulsed power research and applications // Proc. 12th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Monterey, USA, June 27–30, 1999. P. 765–768.
3. **Мали В. И., Тесленко Т. С.** Структура и свойства взрывных компактов медь — молибден // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 4. С. 106–111.
4. **Прюммер Р.** Обработка порошкообразных материалов взрывом. М.: Мир, 1990.
5. **Калинин А. Н.** Об определении коэффициента теплопроводности двухточечным тепловым зондированием поверхности образца // Инж.-физ. журн. 1976. Т. 30, № 4. С. 693–699.
6. **Пат. № 2075068 (Россия).** Способ определения теплопроводности материалов и устройство для его осуществления / А. Н. Калинин. Опубл. Б.И. 1997. № 7.
7. **ГСССД 39-82.** Молибден. Теплопроводность в диапазоне температур 200–2600 К. М.: Изд-во стандартов, 1983.
8. **Новицкий Л. А., Кожевников И. Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975.
9. **Нестеренко В. Ф.** Импульсное нагружение гетерогенных материалов. Новосибирск: Наука, 1992.
10. **Костюков Н. А., Кузьмин Г. Е.** Критерий возникновения макронеоднородностей типа «центральной зоны» при ударно-волновом воздействии на пористые среды // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 5. С. 87–96.
11. **Киркпатрик С.** Теория и свойства неупорядоченных материалов. Перколяция и проводимость. М.: Мир, 1977.
12. **Груздев В. А., Коваленко Ю. А.** Эффективная теплопроводность спрессованных металлических порошков. Аналогия с механическими характеристиками. Новосибирск, 1988. (Препринт / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики; № 187-88).

Поступила в редакцию 8/IV 2002 г.