

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ СПЛАВОВ РЕНИЙ—МОЛИБДЕН В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

*Серджин Н.Н.,^{*1,2,3} Хищенко К.В.^{1,3,4,5,6}*

¹ОИВТ РАН, Москва, Россия, ²МИФИ, Москва, Россия, ³ФИЦ ПХФ
и МХ РАН, Черноголовка, Россия, ⁴МФТИ, Долгопрудный, Россия,
⁵ЮУрГУ, Челябинск, Россия, ⁶Филиал МГУ, Саров, Россия
**nikser12@yandex.ru*

Знание термодинамических свойств материалов представляет интерес для решения фундаментальных и прикладных задач теплофизики интенсивных импульсных воздействий [1, 2]. Взаимосвязь между термодинамическими характеристиками вещества определяется его уравнением состояния.

Сплавы рения с молибденом применяются в аэрокосмической [3] и атомной технике [4], в различных энергетических устройствах [5, 6].

В настоящей работе представлена модель термодинамики сплава Re–Mo при высоких давлениях и температурах на основе уравнений состояния и массовых долей компонентов сплава.

Калорическое и термическое уравнения состояния каждого компонента определяется в виде сумм:

$$E(V, T) = E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T), \quad (1)$$

$$P(V, T) = P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T), \quad (2)$$

где E и P — удельная внутренняя энергия и давление; V и T — удельный объем и температура; E_c и P_c — холодные составляющие внутренней энергии и давления при $T = 0$; E_a и P_a — тепловой вклад тяжелых частиц (атомов, ионов) в E и P ; E_e и P_e — тепловой вклад электронов в E и P .

С учетом этого уравнение состояния сплава задается соотношениями для объема и энергии:

$$V_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad E_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T), \quad (3)$$

где V_{1N} и E_{1N} — удельный объем и удельная внутренняя энергия сплава; V_i , E_i и α_i — удельный объем, удельная внутренняя энергия и массовая доля i -того компонента; N — количество компонентов.

Результаты расчетов ударных адиабат на основе этих уравнений состояния для компонентов (Re и Mo) и сплава Re–Mo с разными массовыми долями Re и Mo согласуются с ударно-волновыми данными в широком диапазоне плотностей, давлений и внутренних энергий.

Эти результаты также сопоставлены с ударными адиабатами сплавов Re–Mo, рассчитанными по методу аддитивности ударных адиабат компонентов [7, 8]:

$$V_{1N}(P) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P). \quad (4)$$

Здесь удельные объемы соответствуют точкам на ударных адиабатах при заданном давлении. В рассмотренном диапазоне давлений ударного сжатия результаты расчетов по методу аддитивности (в которых ударные адиабаты компонентов рассчитывались по их уравнениям состояния) и по уравнению состояния сплава оказываются ближе друг к другу, чем погрешность имеющихся данных ударно-волновых экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

1. Бушман А. В., Канель Г. И., Ни А. Л., Фортов В. Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черногловка: ИХФ АН СССР, 1988.
2. Красюк И. К., Пашинин П. П., Семенов А. Ю., Фортов В. Е. Изучение теплофизических и механических свойств вещества в экстремальных условиях // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 7. С. 593–608.
3. Mannheim R. L., Garin J. L. Structural identification of phases in Mo–Re alloys within the range from 5 to 95% Re // J. Mater. Process. Technol. 2003. V. 143. P. 533–538.
4. Busby J. T., Leonard K. J., Zinkle S. J. Radiation-damage in molybdenum–rhenium alloys for space reactor applications // J. Nucl. Mater. 2007. V. 366. № 3. P. 388–406.
5. Xu J., Leonhardt T., Farrell J., Effgen M., Zhai T. Anomalous strain-rate effect on plasticity of a Mo–Re alloy at room temperature // Mater. Sci. Eng. A. 2008. V. 479. № 1–2. P. 76–82.
6. Singh V., Schneider B. H., Bosman S. J., Merckx E. P. J., Steele G. A. Molybdenum–rhenium alloy based high- Q superconducting microwave resonators // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. № 22. P. 222601.
7. Дремин А. Н., Карпунин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. 1960. № 3. С. 184–188.
8. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152–155.