

Научная статья

УДК 539.89

doi: 10.17223/19988621/94/13

Численное моделирование высокоэнергетического воздействия на Al_2O_3

Константин Константинович Маевский

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия, konstantinm@hydro.nsc.ru*

Аннотация. Представлены результаты моделирования ударно-волнового нагружения оксида алюминия (Al_2O_3) с учетом полиморфного фазового перехода. Построены уравнения состояния Al_2O_3 для фазы низкого и фазы высокого давления. Рассматривая образец как смесь двух фаз в области фазового перехода, рассчитана ударная адиабата в диапазоне давления до 1 200 ГПа. Определены температурные зависимости изобарной теплоемкости и энтропии. Результаты расчетов сравниваются с теоретическими и экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Ключевые слова: ударная адиабата, полиморфный фазовый переход, керамические материалы, сапфир, оксид алюминия

Благодарности: Работа выполнена в рамках Бюджетного проекта № FWGG-2021-0006.

Для цитирования: Маевский К.К. Численное моделирование высокоэнергетического воздействия на Al_2O_3 // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 94. С. 163–174. doi: 10.17223/19988621/94/13

Original article

Numerical simulation of a high-energy impact on Al_2O_3

Konstantin K. Maevskii

*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, konstantinm@hydro.nsc.ru*

Abstract. Aluminum oxide (Al_2O_3) is an important ceramic material with remarkable compressive strength and hardness. Al_2O_3 is a major component of Earth's mantle which makes a significant contribution to high-pressure physics. The construction of a shock adiabatic curve in a wide range of pressures and the determination of the location of phase transitions under shock-wave loading are associated with the derivation of the equation of state. The shock-wave loading of Al_2O_3 is numerically simulated using a thermodynamic equilibrium model. The equations of state for the two phases of the material are constructed. The missing parameters are obtained based on the correspondence with the

experimental data. The dependences of the heat capacity and entropy on the temperature of both phases are plotted, and shock adiabatic curves in the pressure range from 1 GPa to 1.2 TPa are constructed. The high-pressure phase transition is taken into account in calculations. The obtained results are verified and validated using available data from other authors. The presented results provide a basis for considering the theoretical equation of state under extreme conditions, where, nowadays, the model calculations demonstrate significant diversity.

Keywords: shock adiabatic curve, polymorphic phase transition, ceramic materials, sapphire, aluminum oxide

Acknowledgments: This work was partially supported by the State assignment for the Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS (project No. FWGG–2021–0006).

For citation: Maevskii, K.K. (2025) Numerical simulation of a high-energy impact on Al_2O_3 . *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 94. pp. 163–174. doi: 10.17223/19988621/94/13

Введение

Оксид алюминия Al_2O_3 (сапфир) является важным керамическим материалом, отличающимся высокой прочностью на сжатие и твердостью [1]. В связи с перспективностью использования данного материала проводятся эксперименты и теоретические исследования при высоких динамических нагрузках для разработки моделей поведения керамик и композитов на их основе [2–4]. В то же время Al_2O_3 является основным компонентом мантии Земли и вносит значительный вклад в область физики высоких давлений [5–7]. Проводятся исследования гетерогенных материалов, включающих в себя Al_2O_3 в качестве компонента [8, 9]. Возможность фазовых переходов в оксиде алюминия при ударном сжатии представляет большой интерес при исследованиях строения Земли и поведения керамических материалов. При этом фазовые переходы влияют в том числе на интерпретацию данных экспериментов по статическому и ударному сжатию при сверхвысоких давлениях [10–16]. В работе [17] представлены исследования, согласно которым существует фазовый переход высокого давления в оксиде алюминия, который не может быть получен методами статического сжатия. Такой переход был предсказан при значении давления ~ 370 ГПа [18]. Расчет ударной адиабаты в широком диапазоне давлений с учетом фазовых переходов при высокоэнергетическом воздействии связан с разработкой уравнений состояния (УрС) [16, 19–21]. Несмотря на большой интерес к характеристикам сапфира при ударно-волновом нагружении, экспериментальные исследования при высоких значениях давления пока ограничены.

Цель настоящего исследования заключается в построении уравнения состояния сапфира для достоверного описания данных по высокоэнергетическому воздействию на сапфир и определения области фазового перехода высокого давления. В данной работе моделируется ударно-волновое нагружение $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, в области фазового перехода исследуемый материал рассматривается в виде смеси фазы низкого давления и фазы высокого давления. Фазе низкого давления соответствует $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, при высоком давлении рассматривается фаза типа CaIrO_3 , которая была синтезирована из исходного образца корунда при значении давления в области 170 ГПа и температурах в диапазоне 2 000–2 500 К [7].

Методика расчета

Численное моделирование поведения Al_2O_3 при ударно-волновых нагрузках выполнено в представлениях термодинамически равновесной модели [22, 23]. Используемая модель позволяет достоверно описывать данные ударно-волновых экспериментов в диапазоне значений давления от 3 до 2 000 ГПа и пористости образцов (отношение плотности сплошного образца к плотности исследуемого) от 1 до 10 для чистых веществ и для гетерогенных материалов. С учетом диапазона данной модели метастабильные структуры так называемых переходных оксидов алюминия (таких как χ , κ , γ , δ , η , θ), существующие при низких давлениях, не рассматриваются. Авторский метод расчета впервые позволяет достоверно описывать значения давления, плотности, волновую и массовую скорости смесей и сплавов с компонентами, испытывающими фазовый переход при ударно-волновых нагрузках [24, 25].

Численное моделирование выполняется на основе предположения, что компоненты гетерогенного образца при ударно-волновом нагружении имеют равные значения давления, температуры и скорости. УрС выписывается в виде суммы компонентов давления P_C , P_T (потенциальных и тепловых), ρ – текущая плотность образца, ρ_0 – начальная плотность, $\sigma = \rho/\rho_0$ – степень сжатия, T – значение температуры, $T_0 = 300$ К, $\tau = T/T_0$ [22]:

$$P(\sigma, \tau) = P_C(\sigma) + P_T(\sigma, \tau) \quad (1)$$

$$P_C(\sigma) = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\sigma^n - 1), \quad P_T(\sigma, \tau) = c_{v0} \rho_0 T_0 (\tau - 1) \sigma k \frac{1 + a_1 \tau}{1 + a_2 \tau}. \quad (2)$$

Здесь c_{v0} – значение теплоемкости, c_0 – скорость звука при начальных условиях T_0 ; n , k , a_1 , a_2 – параметры УрС. Значение начальной энергии при нормальных условиях не учитывается, исходя из области применения модели по значению давления.

Рассчитаны значения теплоемкости c_p вдоль изобары и функция энтропии S . Методика определения параметров, используемых при расчетах, приведена в [22]. Термодинамический потенциал Гиббса G рассчитывается в следующем виде, где E – удельная энергия:

$$G(\sigma, \tau) = E(\sigma, \tau) + \frac{P(\sigma, \tau)}{\sigma \rho_0} - T_0 \tau S(\sigma, \tau) \quad (3)$$

При расчете ударных адиабат исследуемых гетерогенных образцов на фронте ударной волны выписываются условия сохранения потока массы для каждого компонента, при этом условие сохранения потока импульса и потока энергии рассматривается для образца как целого. Газ в порах (в случае рассмотрения пористого вещества) учитывается как один из компонентов. Этот метод позволяет моделировать различные по составам материалы. Чистые вещества описываются как смесь, включающая в себя один конденсированный компонент. Для образца, включающего в себя z компонентов с начальными объемными долями μ_{k0} , получено следующее выражение:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^z A_i \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i} \left[\left(h_i - \frac{n_i + 1}{n_i - 1} \right) \sigma_i^{z_i} + \frac{2n_i \sigma_i}{n_i - 1} - h_i - 1 \right]}{\sum_{i=1}^z \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i} h_i + \left(\frac{h_g}{\sigma_g} \right) \left(1 - \sum_{i=1}^z \mu_{i0} \right) - 1}, \quad (4)$$

$$A_i = \frac{\rho_{0i} c_{0i}^2}{n_i}, \quad h_i = \frac{2}{\Gamma_i} + 1, \quad h_g = \frac{2}{\gamma - 1} + 1,$$

A_i, n_i – параметры, $\sigma_i = \rho_i/\rho_{i0}$ – степень сжатия для конденсированного компонента i ; $\sigma_g = \rho_g/\rho_{g0}$ – степень сжатия газа. Для газа используется УрС идеального газа; ρ_g – текущая плотность газа, ρ_{g0} – начальная плотность, $\gamma = 1.41$ – показатель адиабаты. Теплоемкость газа 718 Дж/(кг К), $\rho_{g0} = 1.293 \cdot 10^{-3}$ г/см³, что соответствует воздуху. Функция $\Gamma = P_T V/E_T$ отражает вклад тепловых компонентов УрСа (E_T – тепловая часть внутренней энергии). С учетом равенства температур компонентов, а также их УрС рассчитаны кривые ударных адиабат гетерогенных материалов.

Методика расчета поведения гетерогенных материалов по авторской модели дает возможность рассчитывать в том числе поведение исследуемых образцов с учетом полиморфных фазовых переходов. Образец моделируется в этом случае как смесь двух фаз – фазы низкого и фазы высокого давления. На фронте ударной волны выписываются уравнения с учетом фазового перехода. Начало процесса фазового перехода определяется при волновой скорости, когда соответствующие значения G для двух фаз исследуемого материала становятся равными.

Результаты моделирования

Для проверки модельного описания вклада тепловых составляющих в данном УрС построены кривые значения теплоемкости c_p при нормальных условиях в диапазоне значений температуры T 100–2 000 К. Расчет изобарной теплоемкости для сапфира приведен на рис. 1. Для сравнения приведены экспериментальные данные [26, 27] и расчеты по моделям других авторов [28].

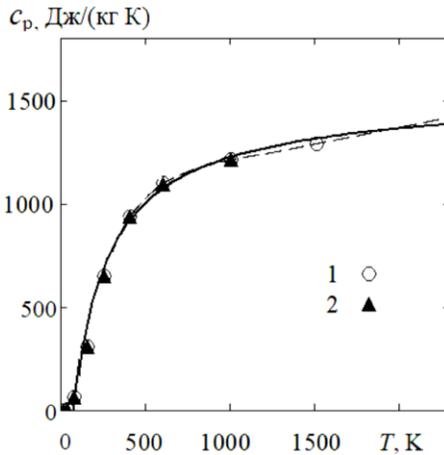


Рис. 1. Теплоемкость Al_2O_3 от температуры: данные 1 [26], 2 [27];

сплошная линия – модельный расчет, пунктирная линия – данные [28]

Fig. 1. Heat capacity of Al_2O_3 as a function of temperature: 1, data from [26], 2, data from [27]; the solid line indicates the model calculation, and the dashed line, data from [28]

На рис. 2 приведены зависимости значения энтропии для Al_2O_3 и данные из работы [28] в диапазоне значений температуры до 3 500 К. Расчетные кривые по авторской модели для сапфира не противоречат ранее полученным результатам.

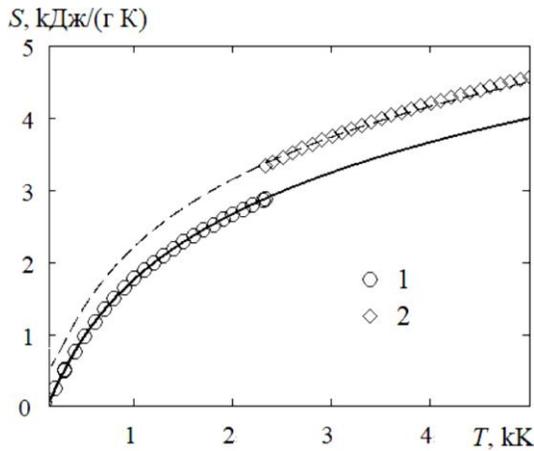


Рис. 2. Энтропия Al_2O_3 от температуры: сплошная линия – расчет для фазы низкого давления, пунктирная линия – расчет для фазы высокого давления, данные [28]

Fig. 2. Entropy of Al_2O_3 as a function of temperature: the solid line is the calculation for a low-pressure phase, the dashed line is the calculation for a high-pressure phase; data from [28]

Результаты моделирования ударно-волнового нагружения для Al_2O_3 различных значений пористости m (отношение плотности монолитного образца к плотности исследуемого материала) и экспериментальные данные из работы [29] показаны на рис. 3 (давление P – степень сжатия ρ/ρ_0). Расчетные кривые соответствуют имеющимся данным экспериментов для всех значений пористости. Для пористости 1.015 одна точка несколько отклоняется от расчетной кривой, что можно трактовать как влияние фазового перехода.

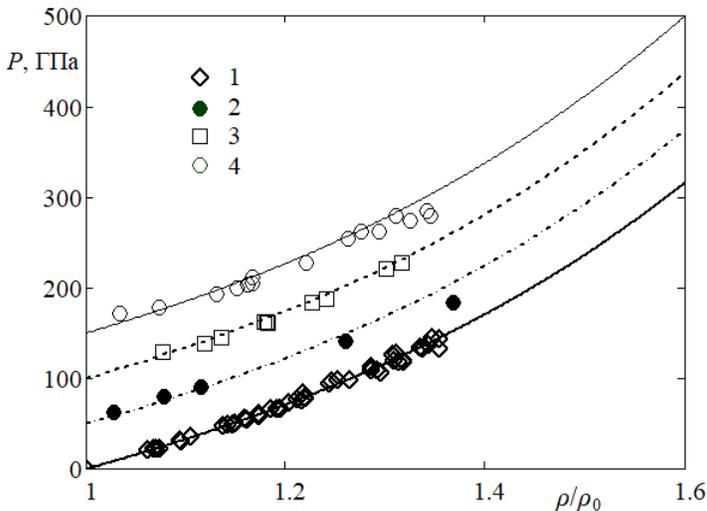


Рис. 3. Ударные адиабаты Al_2O_3 при различных значениях пористости: 1 – $m = 1.0$; 2 – $m = 1.015$; 3 – $m = 1.038$; 4 – $m = 1.168$

Fig. 3. Shock adiabatic curves for Al_2O_3 at various porosity values: $m = (1)$ 1.0, (2) 1.015, (3) 1.038, and (4) 1.168

Расчетные зависимости термодинамического потенциала показаны на рис. 4. Дополнительной линией показано значение волновой скорости 13 км/с, где значения термодинамических потенциалов Гиббса для фазы низкого и фазы высокого давления равны. Значение давления 215 ГПа, соответствующее этой скорости на ударной адиабате, рассматривается как начало области фазового перехода высокого давления при ударно-волновом нагружении. Данный подход к определению начала фазового перехода был ранее успешно апробирован для германия [29].

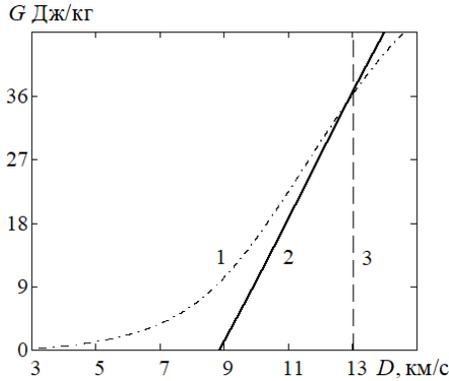


Рис. 4. Термодинамический потенциал Al_2O_3 двух фаз: для фазы высокого давления (1), для фазы низкого давления (2), $D = 13$ км/с (3)

Fig. 4. Thermodynamic potential of Al_2O_3 for two phases: (1) high-pressure phase, (2) low-pressure phase, and (3) $D = 13$ km/s

Расчеты по авторской модели для сапфира и данные экспериментов из работ [5, 30, 31] показаны на рис. 5 (давление P – плотность ρ).

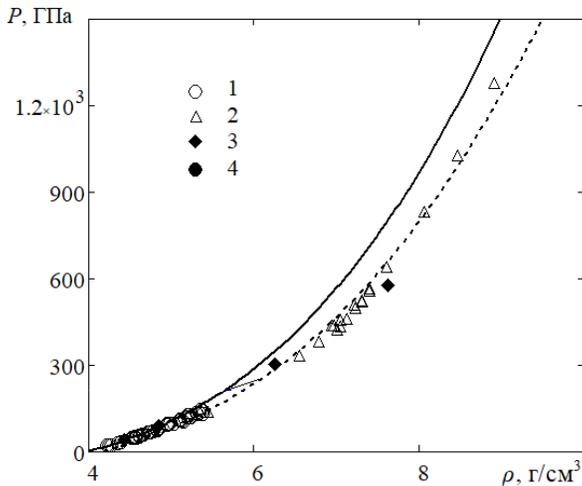


Рис. 5. Ударные адиабаты Al_2O_3 : сплошная кривая – расчет для фазы низкого давления, пунктирная для фазы высокого давления; данные 1, 4 [30], 2 [5], 3 [31]

Fig. 5. Shock adiabatic curves for Al_2O_3 : the solid line is the calculation for a low-pressure phase, the dashed line is the calculation for a high-pressure phase; 1 and 4, data from [30]; 2, data from [5], and 3, data from [31]

Значение плотности фазы высокого давления рассчитано, учитывая экспериментальные данные [5], согласно которым объем образца при фазовом переходе уменьшается на 5%. При значении давления 280 ГПа определяется окончание фазового перехода, т.е. полный переход в фазу высокого давления при ударно волновом воздействии. Получено достоверное описание имеющихся экспериментальных данных.

Данные по экспериментальному исследованию сапфира в диапазоне давлений от 340 до 700 ГПа приведены в [32]. Методами оптической пирометрии была определена температура за фронтом распространения ударной волны. На рис. 6 показаны расчетные кривые зависимости температуры от плотности на ударной адиабате по авторской модели и данные экспериментов и расчетов работы [32].

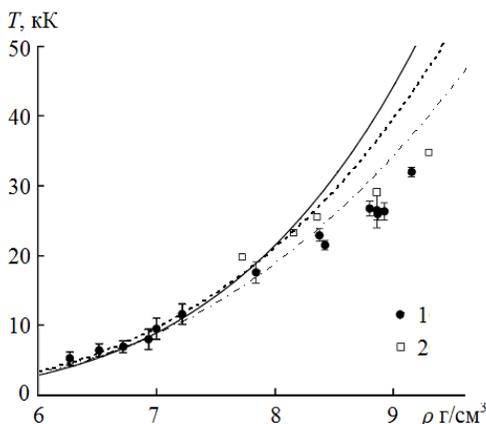


Рис. 6. Значение температуры в зависимости от плотности образца Al_2O_3 : сплошная кривая – данные [32], пунктирная кривая – расчет этой работы для фазы низкого давления, штрих-пунктирная – для фазы высокого давления; данные 1 [32], 2 [33, 34]

Fig. 6. Temperature as a function of density of Al_2O_3 sample: the solid line is the data from [32], the dashed line is the calculation for a low-pressure phase, and the dotted and dashed line is the calculation for a high-pressure phase; 1, data from [32]; and 2, data from [33, 34]

Определена зависимость для объемной скорости звука c_B исследуемого образца сапфира. При этом используется модуль изэнтропического сжатия $K_S = -V(\partial P/\partial V)_S$:

$$c_B = \sqrt{K_S / \rho}, \quad K_S = V \left[\frac{T}{c_V} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V^2 - \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \right].$$

На рис. 7 приведены расчетная кривая объемной скорости вдоль ударной адиабаты и данные экспериментов из работы [5] в диапазоне значений давления от 300 до 800 ГПа. Модельные расчеты в рассматриваемом диапазоне не противоречат ранее полученным данным.

Приведенные результаты численного моделирования термодинамических параметров исследуемых образцов сапфира по авторской модели показывают, что расчет соответствует как численным, так и экспериментальным данным, полученным различными авторами.

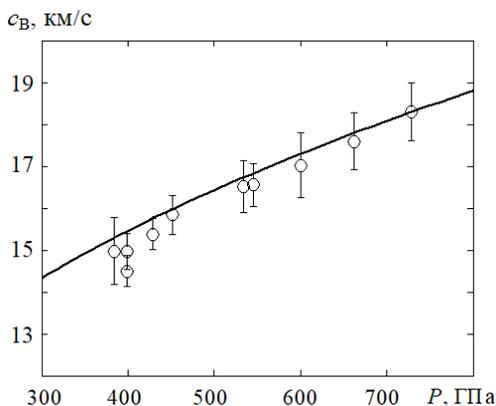


Рис. 7. Расчет и данные экспериментов зависимости c_B на ударной адиабате: сплошная кривая – модельный расчет; данные [5]

Fig. 7. Calculated and experimental values of c_B on the shock adiabat curve: the solid line is the model calculation; data from [5]

Заключение

Таким образом, в работе показаны результаты моделирования по малопараметрическому УрСам двух фаз Al_2O_3 . Используемые параметры УрС позволяют достоверно описывать значения термодинамических параметров при ударно-волновом нагружении исследуемых образцов, а также теплоемкость, энтропию и термодинамический потенциал Гиббса. Ударные адиабаты по значению давления от 3 до 1 200 ГПа соответствуют имеющимся данным для обеих фаз сапфира. При малом количестве параметров (семь), определенных по соответствию расчетов результатам экспериментов [22], получено непротиворечивое описание высокоэнергетического воздействия на образцы сапфира. Данный метод дает возможность рассчитывать поведение гетерогенных материалов, в состав которых входят компоненты, испытывающие фазовые переходы при высокоэнергетическом воздействии [24], и может быть полезным при исследовании таких образцов.

Список источников

1. Lin J.F., Degtyareva O., Prewitt C.T., Dera P., Sata N., Gregoryanz E., Mao H., Hemley R.J. Crystal structure of a high-pressure high temperature phase of alumina by in situ X-ray diffraction // *Nature materials*. 2004. V. 3. P. 389–393. doi: 10.1038/nmat1121
2. Зелугин С.А., Толкачев В.Ф., Тырышкин И.М. Анализ эффективности противоударной стойкости двух групп керамических и композитных материалов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 80. С. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8
3. Промахов В.В., Коробенков М.В., Шульц Н.А., Жуков А.С., Олисов А.В., Бахмат В.Р., Дронов Ф.Ю., Мялковский И.С. Моделирование накопления повреждений и разрушения керамических композитов $Al_2O_3-ZrO_2$, полученных по аддитивным технологиям, при высокоскоростном нагружении // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2021. № 72. С. 140–157. doi: 10.17223/19988621/72/12
4. Kashin A.D., Kulkov A.S., Kulkov S.N., Kurovics E., Gömze L.A. Study of Transverse Deformation of Porous Alumina during Uniaxial Mechanical Tests Al_2O_3 // *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2021. V. 73 (4). P. 145–148. doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.21

5. McCoy C.A., Kalita P., Knudson M.D., Desjarlais M.P., Duwal S., Root S. Hugoniot, sound speed, and phase transitions of single-crystal sapphire for pressures 0.2–2.1 TPa // *Physical Review B*. 2023. V. 107. Art. 214102. doi: 10.1103/PhysRevB.107.2141024
6. Kato J., Hirose K., Ozawa H., Ohishi Y. High-pressure experiments on phase transition boundaries between corundum, $Rh_2O_3(II)$ - and $CaIrO_3$ -type structures in Al_2O_3 // *American Mineralogist*. 2013. V. 98. P. 335–339. doi: 10.2138/am.2013.4133
7. Ono S., Oganov A.R., Koyama T., Shimizu H. Stability and compressibility of the high-pressure phases of Al_2O_3 up to 200 GPa: Implications for the electrical conductivity of the base of the lower mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 246. P. 326–335. doi: 10.1016/j.epsl.2006.04.017.
8. Marchenko E.I., Oganov A.R., Mazhnik E.A. et al. Stable compounds in the $CaO-Al_2O_3$ system at high pressures // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2022. V. 49. Art. 44. doi: 10.1007/s00269-022-01221-6
9. Rocha-Rangel E., Rodríguez-García J.A., Castillo-Robles J.A., Mireles E.N.A., Calles-Arriaga C.A. Mathematical Simulation of the Wettability of Al_2O_3 Substrate through Different Aluminum Alloys // *Journal of Composites Science*. 2021. V. 5. Art. 161. doi: 10.3390/jcs5060161
10. Mashimo T., Tsumoto K., Nakamura K. High-pressure phase transformation of corundum ($\alpha-Al_2O_3$) observed under shock compression // *Geophysical Research Letters*. 2000. V. 27 (14). P. 2012–2024. doi: 10.1029/2000GL008490
11. Ansell S., Krishnan S., Weber J.K.R., Felten J.J., Nordine P.C., Beno M.A., Price D.L. Saboungi M.L. Structure of liquid aluminum oxide // *Physical Review Letters*. 1997. V. 78. P. 464–466. doi: 10.1103/PhysRevLett.78.464
12. Ahuja R., Belonoshko A.B., Johansson B. Melting and liquid structure of aluminum oxide using a molecular-dynamics simulation // *Physical Review E*. 1998. V. 57. P. 1673–1676. doi: 10.1103/PhysRevE.57.1673
13. Sinn H., Glorieux B., Hennet L., Alatas A., Hu M., Alp E.E., Bermejo F.J., Price D.L., Saboungi M.L. Microscopic dynamics of liquid aluminum oxide // *Science*. 2003. V. 299. P. 2047–2049. doi: 10.1126/science.1080950
14. Krishnan S., Hennet L., Jahn S., Key T.A., Madden P.A., Saboungi M.L., Price D.L. Structure of Normal and Supercooled Liquid Aluminum Oxide // *Chemistry of Materials*. 2005. V. 17. P. 2662–2666. doi: 10.1021/cm050254p
15. Gust W.H., Royce E.B. Dynamic yield strengths of B_4C , BeO and Al_2O_3 ceramics // *J. Appl. Phys.* 1971. V. 42. P. 276–295. doi: 10.1063/1.1659584
16. Liu H., Tse J.S., Nellis W.J. The electrical conductivity of Al_2O_3 under shock-compression // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Art. 12823. doi: 10.1038/srep12823
17. Hari A., Hari R., Heighway P.G., Smith R.F., Duffy T.S., Sims M., Singh S., Fratanduono D.E., Bolme C.A., Gleason A.E., Coppari F., Lee H.J., Granados E., Heimann P., Eggert J.H., Wicks J.K. High pressure phase transition and strength estimate in polycrystalline alumina during laser-driven shock compression // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2023. V. 35. Art. 094002. doi: 10.1088/1361-648X/aca860
18. Umemoto K., Wentzcovitch R.M. Prediction of an U_2S_3 -type polymorph of Al_2O_3 at 3.7 Mbar // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2008. V. 105 (18). P. 6526–6530. doi: 10.1073/pnas.0711925105
19. Ломоносов И.В. Уравнения состояния сапфира, кремнезема, периклаза и рутила // *Теплофизика высоких температур*. 2023. Т. 61, № 3. С. 473–476. doi: 10.31857/S004036442303016
20. Ostrik A.V., Nikolaev D.N. Shock induced melting of sapphire // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. V. 2154. Art. 012010. doi: 10.1088/1742-6596/2154/1/012010
21. Tsuchiya J., Tsuchiya T., Wentzcovitch R.M. Transition from the $Rh_2O_3(II)$ -to- $CaIrO_3$ structure and the high-pressure-temperature phase // *Physical Review B*. 2005. V. 72. Art. 020103. doi: 10.1103/PhysRevB.72.020103
22. Маевский К.К. Численное моделирование термодинамических параметров углерода // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59, № 5. С. 701–706. doi: 10.31857/S0040364421050148

23. *Маевский К.К.* Силикаты магния при высоких динамических нагрузках // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 111–119. doi: 10.17223/19988621/79/10
24. *Maevskii K.K., Kinelovskii S.A.* Model of behavior of nitrides and their mixtures under high dynamic loads // AIP Conference Proceedings. 2014. V. 1623. P. 391–394. doi: 10.1063/1.4898964
25. *Maevskii K.K., Kinelovskii S.A.* Thermodynamic parameters of mixtures with epoxy as a component under shock wave loading // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 946. Art. 012113. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012113
26. *Григорьев И.С., Мейлихова Е.З.* Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991.
27. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976.
28. *Гуревич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1979. Т. III, кн. 1.
29. *Маевский К.К.* Численное моделирование термодинамических параметров германия // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, № 6. С. 837–843. doi: 10.31857/S0040364422050210
30. *Marsh S.P.* LASL Shock Hugoniot Data. Berkeley: Univ. California Press, 1980.
31. *Павловский М.Н.* Ударная сжимаемость шести высокотвердых веществ // Физика твердого тела. 1970. Т. 12, № 7. С. 2175–2178.
32. *Ostrik A.V., Nikolaev D.N.* Construction of the equations of state for polycrystalline solids for the purpose of the numerical solution of problems of continuous medium mechanics // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1392. Art. 012017. doi: 10.1088/1742-6596/1392/1/012017
33. *Kerley G.I.* Equation of state and constitutive models for numerical simulations of dust impacts on the solar probe: Report on contract 949182 / Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory. Laurel, MD, 2009.
34. *Miller J.E.* 48th annual APS Meeting, division of Plasma physics. 2006. URL: https://www.lln.rochester.edu/media/publications/presentations/documents/APS06/Miller_APS06.pdf

References

1. Lin J.F., Degtyareva O., Prewitt C.T., Dera P., Sata N., Gregoryanz E., Mao H., Hemley R.J. (2004) Crystal structure of a high-pressure high temperature phase of alumina by in situ X-ray diffraction. *Nature Materials*. 3. pp. 389–393. doi: 10.1038/nmat1121
2. Zelepugin, S.A., Tolkachev, V.F., Tyryshkin, I.M. (2022) *Analiz effektivnosti protivoudarnoy stoykosti dvukh grupp keramicheskikh i kompozitnykh materialov* [Analysis of impact resistance for two groups of ceramic and composite materials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8
3. Promakhov V.V., Korobnikov M.V., Shul'tz N.A., Zhukov A.S., Olisov A.V., Bakhmat V.R., Dronov F.Yu., Myalkovskiy I.S. (2021) *Modelirovanie nakopleniya povrezhdeniy i razrusheniya keramicheskikh kompozitov Al₂O₃-ZrO₂, poluchennykh po additivnym tekhnologiyam, pri vysokoskorostnom nagruzhении* [Modeling the accumulation of damages and the failure of ceramic composites Al₂O₃-ZrO₂, obtained by additive technologies, under high-speed loading]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 72. pp. 140–157. doi: 10.17223/19988621/72/12
4. Kashin A.D., Kulkov A.S., Kulkov S.N., Kurovics E., Gömze L.A. (2021) Study of transverse deformation of porous alumina during uniaxial mechanical tests Al₂O₃. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 73(4). pp. 145–148. doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.21
5. McCoy C.A., Kalita P., Knudson M.D., Desjarlais M.P., Duwal S., Root S. (2023) Hugoniot, sound speed, and phase transitions of single-crystal sapphire for pressures 0.2–2.1 TPa. *Physical Review B*. 107. Article 214102. doi: 10.1103/PhysRevB.107.214102

6. Kato J., Hirose K., Ozawa H., Ohishi Y. (2013) High-pressure experiments on phase transition boundaries between corundum, $Rh_2O_3(II)$ - and $CaIrO_3$ -type structures in Al_2O_3 . *American Mineralogist*. 98. pp. 335–339. doi: 10.2138/am.2013.4133
7. Ono S., Oganov A.R., Koyama T., Shimizu H. (2006) Stability and compressibility of the high-pressure phases of Al_2O_3 up to 200 GPa: Implications for the electrical conductivity of the base of the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*. 246. pp. 326–335. doi: 10.1016/j.epsl.2006.04.017
8. Marchenko E.I., Oganov A.R., Mazhnik E.A., Eremin N.N. (2022) Stable compounds in the $CaO-Al_2O_3$ system at high pressures. *Physics and Chemistry of Minerals*. 49. Article 44. doi: 10.1007/s00269-022-01221-6
9. Rocha-Rangel E., Rodríguez-García J.A., Castillo-Robles J.A., Mireles E.N.A., Calles-Arriaga C.A. (2021) Mathematical simulation of the wettability of Al_2O_3 substrate through different aluminum alloys. *Journal of Composites Science*. 5. Article 161. doi: 10.3390/jcs5060161
10. Mashimo T., Tsumoto K., Nakamura K. (2000) High-pressure phase transformation of corundum ($a-A_2O_3$) observed under shock compression. *Geophysical Research Letters*. 27(14). pp. 2012–2024. doi: 10.1029/2000GL008490
11. Ansell S., Krishnan S., Weber J.K.R., Felten J.J., Nordine P.C., Beno M.A., Price D.L., Saboungi M.L. (1997) Structure of liquid aluminum oxide. *Physical Review Letters*. 78. pp. 464–466. doi: 10.1103/PhysRevLett.78.464
12. Ahuja R., Belonoshko A.B., Johansson B. (1998) Melting and liquid structure of aluminum oxide using a molecular-dynamics simulation. *Physical Review E*. 57. pp. 1673–1676. doi: 10.1103/PhysRevE.57.1673
13. Sinn H., Glorieux B., Hennet L., Alatas A., Hu M., Alp E.E., Bermejo F.J., Price D.L., Saboungi M.L. (2003) Microscopic dynamics of liquid aluminum oxide. *Science*. 299. pp. 2047–2049. doi: 10.1126/science.1080950
14. Krishnan S., Hennet L., Jahn S., Key T.A., Madden P.A., Saboungi M.L., Price D.L. (2005) Structure of normal and supercooled liquid aluminum oxide. *Chemistry of Materials*. 17. pp. 2662–2666. doi: 10.1021/cm050254p
15. Gust W.H., Royce E.B. (1971) Dynamic yield strengths of B_4C , BeO and Al_2O_3 ceramics. *Journal of Applied Physics*. 42. pp. 276–295. doi: 10.1063/1.1659584
16. Liu H., Tse J.S., Nellis W.J. (2015) The electrical conductivity of Al_2O_3 under shock-compression. *Scientific Reports*. 5. Article 12823. doi: 10.1038/srep12823
17. Hari A., Hari R., Heighway P.G., Smith R.F., Duffy T.S., Sims M., Singh S., Fratanduono D.E., Bolme C.A., Gleason A.E., Coppari F., Lee H.J., Granados E., Heimann P., Eggert J.H., Wicks J.K. (2023) High pressure phase transition and strength estimate in polycrystalline alumina during laser-driven shock compression. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 35. Article 094002. doi: 10.1088/1361-648X/aca860
18. Umemoto K., Wentzcovitch R.M. (2008) Prediction of an U_2S_3 -type polymorph of Al_2O_3 at 3.7 Mbar. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 105(18). pp. 6526–6530. doi: 10.1073/pnas.0711925105
19. Lomonosov I.V. (2023) Equations of state for sapphire, silica, periclase, and rutile. *High Temperature*. 61. pp. 436–439. doi: 10.1134/S0018151X2303001X
20. Ostriak A.V., Nikolaev D.N. (2022) Shock induced melting of sapphire. *Journal of Physics: Conference Series*. 2154. Article 012010. doi: 10.1088/1742-6596/2154/1/012010
21. Tsuchiya J., Tsuchiya T., Wentzcovitch R.M. (2005) Transition from the $Rh_2O_3(II)$ -to- $CaIrO_3$ structure and the high-pressure-temperature phase. *Physical Review B*. 72. Article 020103. doi: 10.1103/PhysRevB.72.020103
22. Maevskii K.K. (2022) Numerical simulation of thermodynamic parameters of carbon. *High Temperature*. 60(2). pp. S194–S199. doi: 10.1134/S0018151X2105014X
23. Maevskii K.K. (2022) Silikaty magniya pri vysokikh dinamicheskikh nagruzках [Magnesium silicates at high dynamic loading]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 111–119. doi: 10.17223/19988621/79/10

24. Maevskii K.K., Kinelovskii S.A. (2014) Model of behavior of nitrides and their mixtures under high dynamic loads. *AIP Conference Proceedings*. 1623. pp. 391–394. doi: 10.1063/1.4898964
25. Maevskii K.K., Kinelovskii S.A. (2018) Thermodynamic parameters of mixtures with epoxy as a component under shock wave loading. *Journal of Physics: Conference Series*. 946. Article 012113. doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012113
26. Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z. (1997) *Handbook of Physical Quantities*. Boca Raton: CRC Press.
27. Kikoin I.K. (1976) *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow: Atomizdat.
28. Gurevich L.V., Veyts I.V., Medvedev V.A. (1979) *Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv* [Thermodynamic properties of individual substances]. Moscow: Nauka.
29. Mayevskii K.K. (2022) Numerical simulation of the thermodynamic parameters of germanium. *High Temperature*. 60(6). pp. 768–774. doi: 10.1134/S0018151X22050212
30. Marsh S.P. (1980) *LASL Shock Hugoniot Data*. Berkeley: University of California Press.
31. Pavlovskiy M.N. (1970) Udarnaya szhimaemost' shesti vysokotverdykh veshchestv [Shock compression of six highly firm substances]. *Fizika tvyordogo tela – Physics of the Solid State*. 12(3). pp. 2175–2178.
32. Ostriak A.V., Nikolaev D.N. (2019) Construction of the equations of state for polycrystalline solids for the purpose of the numerical solution of problems of continuous medium mechanics. *Journal of Physics: Conference Series*. 1392. Article 012017. doi: 10.1088/1742-6596/1392/1/012017
33. Kerley G.I. (2009) *Equation of State and Constitutive Models for Numerical Simulations of Dust Impacts on The Solar Probe*. Report on Contract 949182. Johns Hopkins University, Applied Physic Laboratory. Laurel, Maryland.
34. Miller J.E. (2006) *48th Annual APS Meeting, Division of Plasma Physics*. Presentation is available at https://www.lle.rochester.edu/media/publications/presentations/documents/APS06/Miller_APS06.pdf

Сведения об авторе:

Маевский Константин Константинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики многофазных сред Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск, Россия). E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

Information about the author:

Maevskii Konstantin K. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; принята к публикации 10.04.2025

The article was submitted 27.03.2024; accepted for publication 10.04.2025