

УДК 53:549.642.21

## Экспериментальное изучение вязкости расплава диопсида при высоком давлении\*

*С.В. Банушкина, А.И. Чепуров*

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
(Новосибирск, Россия)

## Experimental Investigation of Diopside Melt Viscosity at High Pressure

*S.V. Banushkina, A.I. Chepurov*

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS  
(Novosibirsk, Russia)

Проведена экспериментальная оценка вязкости модельного состава на основе диопсида в присутствии кристаллов оливина при высоких P-T параметрах. Давление в опытах составляло 4 ГПа. Температурный интервал — 1750–1800 °C. Эксперименты проведены на многопуансонном аппарате высокого давления типа «разрезная сфера» (БАРС) по методике падающего платинового (Pt) шарика. Одной из измеряемых характеристик в экспериментах является время падения Pt шарика в расплаве с момента выхода на заданные P-T параметры до момента отключения электротока. В результате экспериментов зафиксированы три основных положения Pt шарика в образце. Расчеты вязкости проведены по методу Стокса. Установлено ожидаемое снижение скорости перемещения Pt шариков и, соответственно, увеличение относительной вязкости подобных гетерогенных сред (жидкость+твердая фаза) в отличие от однородных расплавов. При содержании в магме до 7–10 мас.% кристаллов твердых фаз значение вязкости остается низким. С увеличением содержания ксенокристаллов оливина вязкость расплава прогрессивно растет: при 20–25 мас.% — на 1,5–2 порядка, при 35–40 мас.% — на 3–3,5 порядка величины. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что в магме количество твердой фазы должно быть достаточно низким (< 20–30 мас.%), в противном случае перемещение расплава основного состава было бы возможно исключительно при взрывных (взрывных) процессах.

**Ключевые слова:** вязкость, расплав, диопсид, оливин, высокое давление, «разрезная сфера», метод Стокса.

This paper presents the experimental evaluation of viscosity of the diopside-based model composition conducted at high P-T parameters (at the pressure of 4 GPa and in the temperature range of 1750°C -1800°C) in the presence of olivine crystals. The experiments are carried out using the multi-anvil high-pressure apparatus of the “split-sphere” type (Russian acronym — BARS) according to the falling sphere method. The traveling time of a platinum (Pt) sphere in a melt is one of the parameters measured in experiments. Measurement of this parameter starts when the given P-T values are attained and stops when the electric current is turned off. There are three main positions of the Pt sphere observed in the experiments. Viscosity is calculated using the Stokes’ Law. It is found out that the Pt sphere velocity decreases expectedly as the relative viscosity of such heterogeneous compositions (liquid + solid phase) increases (in contrast to homogeneous melts). Viscosity values remain low when there is up to 7–10 wt-% of solid phase crystals in magma. The increase of olivine xenocrysts in magma leads to the progressive increase of viscosity values of the melt: by 1.5–2 orders of magnitude at 20–25 wt-%, by 3–3.5 orders of magnitude at 35–40 wt-%. The obtained experimental results allow concluding that the amount of solid phase in magma should be sufficiently low (less than 20–30 wt-%), otherwise, melts of the investigated composition can be moved only by explosive processes.

**Key words:** viscosity, melt, diopside, olivine, high pressure, “split sphere”, Stokes’ Law.

DOI 10.14258/izvasu(2020)4-02

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева.

**Введение**

Разработка геодинамических моделей перемещения расплавов в мантии и земной коре невозможна без данных по оценке вязкости таких расплавов. Особого внимания заслуживает экспериментальное изучение реологических свойств субликвидусных гетерогенных (жидкость + твердая фаза + газ) сред, к которым и относится основная магма. С учетом значительных расхождений в теоретических оценках вязкости гетерогенных сред, что обусловлено сложностью проведения расчетов, чрезвычайно важным является совершенствование экспериментальных методов для определения вязкости расплава на примере расплава диопсида, содержащего кристаллы минералов.

Известны основные причины, которые приводят к расхождению величин относительной вязкости, полученных в результате теоретического и экспериментального моделирования гетерогенных сред [1–5]. К ним относятся количество твердых частиц в расплаве [6], их форма, ориентация и распределение в объеме, дисперсия размеров. Кроме того, твердые частицы могут перемещаться в расплаве (оседать или всплывать) в течение времени [7]. Существенную роль играют адгезионные свойства минералов, в частности, угол смачивания расплавом. В природных магмах твердые частицы — это ограненные кристаллы, сростки, обломки минералов и пород. В основных магмах они часто представлены кристаллами оливина. Таким образом, определение вязкости гетерогенной среды, насыщенной летучими компонентами и находящейся при высоких Р-Т параметрах магм, остается сложной теоретической задачей. В данном исследовании нами проведена экспериментальная оценка вязкости модельного состава на основе диопсида в присутствии кристаллов оливина при высоких Р-Т параметрах.

**Методы исследования**

Экспериментальное изучение вязкости модельных систем выполняли при высоких Р-Т параметрах, используя методику падающего платинового шарика. Опыты проводили на многопуансонном аппарате высокого давления типа «разрезная сфера» (БАРС). Описание аппаратуры приведено в работах [8, 9]. Многопуансонный блок аппарата состоит из двух ступеней: внешней, включающей в себя

8 стальных пуансонов с треугольной рабочей площадкой, и внутренней, содержащей 6 твердосплавных пуансонов октаэдрической формы с квадратной рабочей площадкой. Во внутренней рабочей полости устанавливают кубическую твердофазовую ячейку с графитовым нагревателем. Для измерения температуры в опытах использовали платино-платинородиевую термопару. Давление в опытах составляло 4 ГПа. Температура экспериментов была в интервале 1750–1800 °С. Точность определения температуры в образцах составляла  $\pm 25$  °С, давления —  $\pm 0,2$  ГПа.

В качестве образцов для исследования использовали навески, спрессованные из порошка исходных веществ в форме цилиндра с Pt шариком в центре. В качестве образцов для исследования были выбраны несколько составов, моделирующих природные магмы основного состава: диопсид и смесь диопсида с оливином. Исходные материалы дробили и перетирали на шаровой мельнице для получения порошка с размером зерен менее 5 мкм, пригодным для прессования образцов. Природный оливин из мантийных ксенолитов из вулкана Шаварын-Царам (Монголия) дробили и отсортировывали в ситах на фракции: <0,25 мм, 0,25–0,5 мм и 0,5–1,0 мм с соотношением длина/ширина от 1:1 до 3:1. После опытов образцы распиливали и шлифовывали. Положение Pt шарика в образце определяли под микроскопом.

Одной из важнейших измеряемых характеристик в экспериментах по определению вязкости является время падения Pt шарика в расплаве с момента выхода на заданные Р-Т параметры до момента отключения электротока. Предварительно была проведена серия калибровочных экспериментов по определению времени начала движения шарика в образце, которое составило  $30 \pm 5$  с после момента выхода на заданную температуру. При вычислении времени движения Pt шарика в ходе эксперимента указанное значение вычиталось из общего временного интервала с момента выхода на заданные Р-Т параметры до момента закалки. Время закалки образца принимали равным  $2,5 \pm 0,5$  с.

**Результаты и обсуждение**

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице.

Таблица

Результаты экспериментов по определению относительной вязкости ( $\eta_r$ ) расплава диопсида с зернами оливина при давлении 4 ГПа

№ опыта	Сод. Ol, мас. %	r, см	ra, см	h, см	$\tau$ , с	l, см	V, см/с	K	$\eta_r$ , Па·с
1	-	0,012	0,3	0,4	40	0,19	$> 1,9 \cdot 10^{-2}$	0,92	$< 2,5$
2	10	0,05	0,3	0,4	60	0,16	$> 5,3 \cdot 10^{-3}$	0,65	$< 8,9 \cdot 10^1$
3	20	0,05	0,3	0,4	60	0,13	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,65	$1,1 \cdot 10^2$
4	30	0,05	0,3	0,4	60	0,10	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,66	$1,4 \cdot 10^2$
5	50	0,04	0,3	0,4	60	-	$< 3,3 \cdot 10^{-4}$	0,79	$> 1,2 \cdot 10^3$

*Примечание.* Сод. Ol — содержание оливина (Ol) в мас.%; r — радиус Pt шарика; ra — радиус ампулы; h — высота ампулы;  $\tau$  — время выдержки; l — длина перемещения шарика; V — скорость перемещения шарика; K — поправка на пристеночный эффект в ампуле.

Заметим, что при закалке низкокремниевых расплавов стекол не образуется, а происходит быстрая кристаллизация расплава с образованием тонкозернистой массы кристаллов, в которой фиксируется Pt шарик в момент закалки. Для расплава диопсидо-

вого состава закалочный матрикс состоит из закалочных кристаллов диопсида. После экспериментов отмечалось три основных положения Pt шарика в образце: 1) в центре; 2) между центром и нижним торцом образца (рис.); 3) внизу образца.

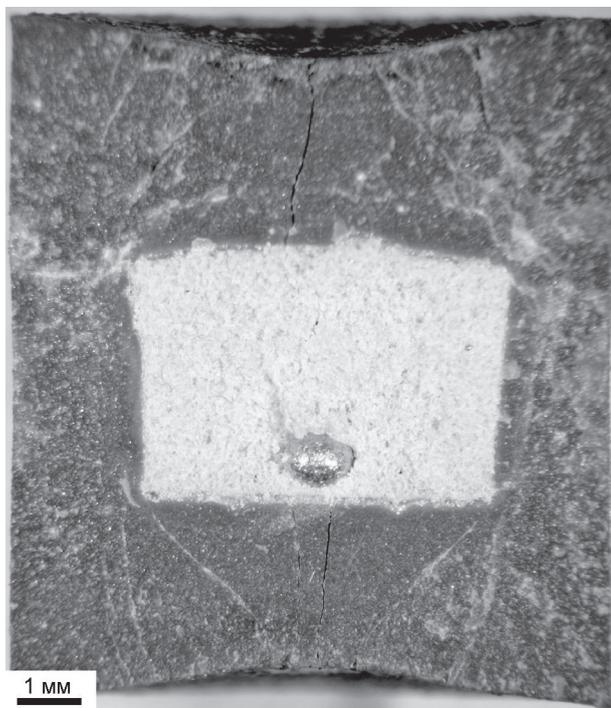


Рис. Положение Pt шарика после опыта. Шарик переместился к нижнему торцу ампулы

Исходя из полученных данных, провели расчеты вязкости с использованием метода Стокса по известной формуле (1) [10]:

$$\eta = [2r^2 \cdot g(\rho_2 - \rho_1) / 9V(1 + 3.3r/h)] \cdot K, \quad (1)$$

где  $\eta$  — вязкость расплава;  $g = 980 \text{ см/с}^2$  — гравитационная постоянная;  $r$  — радиус шарика;  $h$  — расстояние, на которое шарик переместился в ходе эксперимента;  $\rho_2 - \rho_1$  — разность плотностей шарика и расплава;  $V$  — скорость падения шарика в расплаве;  $K$  — поправка на пристеночный эффект в ампуле, рассчитываемая по формуле (2):

$$K = [1 - 2.104(r/r_a) + 2.09(r/r_a)^3 - 0.95(r/r_a)^5], \quad (2)$$

где  $r_a$  — радиус ампулы с образцом.

Величину плотности модельных расплавов принимали  $2,8 \text{ г/см}^3$  [11]. Плотность платины равна  $21,45 \text{ г/см}^3$  [12].

По экспериментальным данным вязкость расплава диопсида при 4 ГПа и 1800 °С, рассчитанная методом Стокса, соответствует 0,63 Па·с, что хорошо согласуется с данными, полученными с исполь-

зованием синхротронного излучения: 0,31 Па·с при 3,5 ГПа и 1730 °С [13]. Предполагается, что значительные пропорции кристаллов оливина в расплаве увеличивают вязкость в 10-100 раз [1].

Нами установлено, что при введении 50 мас.% и более зерен оливина не удалось обнаружить перемещения Pt шарика при параметрах опытов длительностью до 1 ч. Это свидетельствует о высокой относительной вязкости расплавов с указанным содержанием твердого компонента. По нашим оценкам, вязкость системы превышает  $1,2 \cdot 10^3 \text{ Па·с}$  (табл.). С другой стороны, при содержании 10 мас.% зерен оливина и менее перемещение Pt шарика происходило очень быстро, т. е. при содержании ксенокристаллов оливина в расплаве менее 10 мас.% значения вязкости являются очень низкими. Шарик оказывался на дне ампулы в течение менее 10 с. С увеличением содержания ксенокристаллов вязкость прогрессивно растет: при 20-30 мас.% — на 1-2 порядка (для всех исследованных систем), при 50 мас.% — более чем на 3 порядка (табл.). Таким образом, установлено ожидаемое снижение скорости перемещения Pt шариков и, соответственно, увеличение относительной вязкости таких гетерогенных сред в отличие от расплавов, не содержащих твердых фаз.

Значительные расхождения между экспериментальными и расчетными данными получены, например, Н. Sato для базальтового расплава в субликвидусных условиях при атмосферном давлении [14]. В указанной работе установлен рост вязкости при снижении температуры: 52 Па·с при 1230 °С, 350 Па·с при 1170 °С и 1950 Па·с при 1130 °С. Это связано с увеличением количества кристаллов в расплаве при его кристаллизации. Рассчитанные значения вязкости по уравнению Эйнштейна–Роско для частиц твердой фазы сферической формы имеют значительно более сглаженную зависимость. В данном случае убедительно продемонстрировано, что расхождения между измеренными и рассчитанными величинами относительной вязкости в мультифазной среде обусловлены морфологией твердых частиц.

#### Заключение

Геолого-петрологические наблюдения и экспериментальные исследования указывают на чрезвычайно низкую вязкость собственно диоксидового расплава и, соответственно, магмы основного состава. При со-

держании в магме до 7–10 мас.% кристаллов твердых фаз значение вязкости остается очень низким. С увеличением содержания ксенокристаллов вязкость расплава быстро растет: при 20–25 мас.% — на 1,5–2 порядка, при 35–40 мас.% — на 3–3,5 порядка величины. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать важный вывод, а именно: высокое содержание кристаллов в базальтовом расплаве указывает на невозможность сверхскоростного течения жидкости по узким трещинам, что объясняется уменьшением пропускной способности в трещине вследствие присутствия кристаллов и увеличением внутреннего трения при взаимодействии расплава и кристаллов. Отсюда следует вывод, что в магме количество твердой фазы должно быть достаточно низким (< 20–30 мас. %), в противном случае перемещение расплава основного состава было бы возможно исключительно при взрывных (взрывных) процессах. Поэтому отношение между твердыми фазами, жидкостью и газом может создавать эффузивный или взрывной тип извержений [15].

### Библиографический список

1. Pinkerton H., Stevenson R.J. Methods of determining the rheological properties of magmas at sub-liquidus temperatures // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 1992. V. 53. DOI: 10.1016/0377-0273(92)90073-M.
2. Saar M.O., Manda M. Continuum percolation for random by oriented soft-core prisms // *Physical Review E.* 2002. V. 65. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.056131.
3. Caricchi L., Burlini L., Ulmer P. et al. Non-Newtonian reology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 264. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.09.032.
4. Castruccio A., Rust A.C., Sparks R.S.J. Rheology and flow of crystal-bearing lavas: Insights from analogue gravity currents // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 297. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.06.051.
5. Hobiger M., Sonder I., Buttner R., Zimanowski B. Viscosity characteristics of selected volcanic rock melts // *J. of Volcanology and Geothermal Res.* 2011. V. 200. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2010.11.020.
6. Bouhifd M.A., Richer P., Besson P. et al. Redox state, microstructure and viscosity of partially crystallized basalt melt // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 218. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00641-1.
7. Чепуров А.И., Жимулев Е.И., Сонин В.М. и др. Экспериментальная оценка скорости гравитационного фракционирования ксенокристаллов в кимберлитовой магме при высоких P–T параметрах // *Доклады АН.* 2011. Т. 440. № 5.
8. Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. Новосибирск, 1997.
9. Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальные исследования образования алмаза при высоких P–T параметрах // *Геология и геофизика.* 1998. Т. 39. № 2.
10. Lieske C., Schmickler B., Terasaki H. et al. Viscosity of peridotite liquid up to 13 GPa: Implications for magma ocean viscosities // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 240. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.10.004.
11. Sakamaki T., Ohtani E., Urakawa S. et al. Measurement of hydrous peridotite magma density at high pressure using the X-ray absorption method // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 287. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.07.030.
12. Ardia P., Giordano D., Schmidt M.W. A model for the viscosity of rhyolite as a function of H<sub>2</sub>O-content and pressure: A calibration based on centrifuge piston cylinder experiments // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2008. V. 72. DOI: 10.1016/j.gca.2008.08.025.
13. Reid J.E., Suzuki A., Funakoshi K. et al. The viscosity of CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> liquid at pressures up to 13 GPa // *Physics of the Earth and Planet. Interior.* 2003. V. 139. DOI: 10.1016/S0031-9201(03)00143-2.
14. Sato H. Viscosity measurement of subliquidus magmas: 1707 basalt of Fuji volcano // *J. of Mineral. and Petrol. Sci.* 2005. V. 100. DOI: 10.2465/jmps.100.133
15. Moss S., Russell J.K., Brett R.C., Andrews G.D.M. Spatial and temporal evolution of kimberlite magma at A154N, Diavik, Northwest Territories, Canada // *Lithos.* 2009. V. 112. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.03.025.