

16. Gulyaev A.P. Metal science. College level textbook. 6th edition. Metallurgy, Moscow, 1986.
17. Vesnin Yu. I., Abstracts European Crystallographic Meeting ECM-18, B3-P8, Praha, 1998.
18. Meier K. Physical-chemical crystallography. Metallurgy, Moscow, 1972.
19. Ubbelohde A., Melting and crystalline structure, Mir, Moscow, 1969.
20. Burggraaf A. J., *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 1983; 83: 208-215.
21. Nomoev A.V., Bardakhanov S.P., Schreiber M., Bazarova D.Zh., Baldanov B.B. and Romanov N.A.// Synthesis, Characterization, and Mechanism of Formation of Janus-Like Nanoparticles of Tantalum Silicide-Silicon (TaSi₂/Si)// *J. Nanomaterials*, 2015, P. 26-35
22. Nomoev A.V., Radnaev A.R., Baldanov B.B., Torhov N.A., Radnaev B.R., Romanov N.A, Schreiber M. Chemical Physics Letters Thermodynamic considerations in the formation of Janus-like TaSi₂/Sinanoparticles by electron-beam evaporation *Chemical Physics Letters* 637 (2015) 94–96.
23. Rajanikanth V. Joshi, Simulation of current-voltage Characteristics in Schottky barrier and MOS device structures, MS project report, NJIT, Unpublished, 2000.
24. Temuujin J., Bardakhanov S., Nomoev A., Minjigmaa A., Dugersuren G. *Bull. Mater. Sci.* . 2009; 32:
25. Lyakhishcheva N.P. Diagrams of conditions of double crystal systems: reference book in three volumes.: Vol. 2.–Engineering, Moscow, 1997. 1024 p.
26. Temuujin J., Bardakhanov S.P., Nomoev A.V., Zaikovskii V.I., Minjigmaa A., Dugersuren G. Van Riessen A. *Bull. Mater. Sci.* 2009; 32(5): 543–547.
27. Shishkin A.V., Basin A.S. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2004; 38: 660–668.
28. Gulyaev A.P. Metal science. College level textbook. 6th edition. Metallurgy, Moscow, 1986.
29. Shimmel G. Methods of electron microscopy. Mir, Moscow, 1972.
30. Nomoev A.V., Bardakhanov S.P., Schreiber M., Bazarova D.G., Romanov N.A., Baldanov B.B., Radnaev B.R., Syzrantsev V.V. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2015, 6: 874–880.

Сведения об авторах

Раднаев Александр Рабданович, РФ, г. Улан-Удэ, 670000, ул. Смолина, 24а, Бурятский государственный университет, E-mail: radnaev.1961@mail.ru

Номоев Андрей Валерьевич, РФ, г. Улан-Удэ, 670000, ул. Смолина, 24а, Бурятский государственный университет, Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, E-mail: nomoevav@mail.ru

УДК 532.135

doi:10.18.101/978-5-9793-0883-8-12-15

Физико-механические свойства суспензий наночастиц на основе полимерных жидкостей

Б. Б. Бадмаев^{1,2}, Т. С. Дембелова¹, Д. Н. Макарова¹, А. Б. Цыренжапова¹, Б. В. Бадархаев¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН,

670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,

670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, e-mail: fizika@esstu.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования физико-механических свойств коллоидных суспензий наночастиц диоксида кремния в полиэтилсилоксановой жидкости акустическим резонансным методом при частоте сдвиговых колебаний 73.2 кГц. Показано изменение вязкоупругих свойств суспензий в зависимости от концентрации и размеров наночастиц и от величины сдвиговой деформации.

Ключевые слова: наночастицы, коллоидные суспензии, модуль сдвига, вязкость, тангенс угла механических потерь, сдвиговая деформация, смазочные материалы.

Physical-mechanical Properties of the Nanoparticle Suspension Based on Polymer Liquids

B. B. Badmaev^{1,2}, T. S. Dembelova¹, D. N. Makarova¹, A. B. Tsyrenzhapova¹, B. V. Badarkhaev¹

¹Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhyanova Str., 6, Ulan-Ude 670047, Russia, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

²East-Siberia State University of Technology and Management, Kluchevskaya Str., 40V, Ulan-Ude 670013 Russia, e-mail: fizika@esstu.ru

Abstract

The paper presents the results of the study on physical and mechanical properties of colloidal suspensions of silica nanoparticles in polyethylsiloxane using acoustic resonance method at a frequency of 73.2 kHz shear oscillations. Changing of the viscoelastic properties of suspensions depending on the concentration and the size of nanoparticles and the magnitude of shear deformation have been discovered.

Keywords: nanoparticles, colloidal suspensions, shear modulus, viscosity, mechanical loss tangent, shear deformation, lubricants.

В настоящее время большое внимание уделяется созданию высокоэффективных смазочных материалов с улучшенными свойствами посредством применения наноприсадок. Нанотрибологические исследования, проведенные отечественными и зарубежными исследователями, показали, что введение в смазочную среду наноразмерных частиц SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O позволяет улучшить антифрикционные и противоизносные свойства трибосопряжений опорных узлов механизмов и машин [1-4].

В связи с этим представляется актуальным исследование физико-механических свойств коллоидных суспензий наночастиц. В работе использован акустический резонансный метод, адаптированный для исследования вязкоупругих свойств коллоидных суспензий и эмульсий наночастиц [5-10]. Метод заключается в следующем: пьезокварцевый резонатор с основной резонансной частотой 73 кГц совершает тангенциальные колебания. Один конец резонатора контактирует с исследуемым объектом, накрытым твердой накладкой из плавленного кварца. При этом в жидкости устанавливаются стоячие сдвиговые волны. В экспериментах применяется пьезокварцевый кристалл X-18,5° среза, который обладает коэффициентом Пуассона равным нулю, толщина жидкой прослойки намного меньше длины сдвиговой волны $H \ll \lambda$. По изменению акустических параметров системы пьезокварц – прослойка жидкости – накладка (резонансной частоты и ширины резонансной кривой) определяются комплексный модуль сдвига и тангенс угла механических потерь $\text{tg } \theta$ исследуемой жидкости:

$$G^* = \frac{4\pi^2 M f_0 \Delta f^* H}{S}, \quad \text{tg } \theta = \frac{G''}{G'} = \frac{\Delta f''}{\Delta f'}, \quad (1)$$

где $G^* = G' + iG''$ – комплексный модуль сдвига жидкости;

$\Delta f^* = \Delta f' + i\Delta f''$ – комплексный сдвиг резонансной частоты;

M – масса пьезокварца; S – площадь основания накладки; f_0 – резонансная частота пьезокварца;

H – толщина прослойки жидкости.

В работе исследованы физико-механические свойства коллоидных суспензий наночастиц диоксида кремния в полиэтилсилоксановой жидкости акустическим резонансным методом при частоте сдвиговых колебаний 73.2 кГц. Коллоидные суспензии наночастиц получены ультразвуковым методом. Базовым смазочным материалом выбраны полиорганосилоксановые жидкости, которые находят широкое применение в современной технике.

Результаты исследования суспензий наночастиц резонансным методом показали линейную зависимость действительного и мнимого сдвигов частоты от обратной величины толщины жидкой прослойки, что свидетельствует о наличии у данных жидкостей объемного модуля сдвига, т. е. не зависящего от толщины прослойки жидкости. Выявлены особенности зависимости комплексного модуля сдвига, эффективной вязкости и тангенса угла механических потерь исследуемых суспензий от угла сдвиговой деформации (рис. 1–3). Для удобства анализа экспериментальные результаты представлены в зависимости от $\sqrt{A/H}$, где A – амплитуда колебания пьезокварца. Обнаружена более протяженная область линейной упругости на графике зависимости модуля сдвига от величины сдвиговой деформации, свидетельствующая об увеличении прочности структуры коллоидной суспензии наночастиц по сравнению с базовой жидкостью, что представляет практическую ценность.

С увеличением размеров наночастиц протяженность линейной области уменьшается. Эффективная вязкость суспензий рассчитана по реологической модели Максвелла.

По данным кривых 1 рис. 1 можно определить изменение напряжения сдвига в прослойке жидкости при увеличении угла деформации. Эта зависимость показана на рисунке 4. По оси абсцисс на данном рисунке отложены тангенсы угла сдвиговой деформации. Пунктиром показано продолжение линейной зависимости напряжения сдвига, чтобы нагляднее увидеть нелинейность сдвиговой упругости с увеличением угла деформации.

Можно предположить, что жидкость обладает равновесной структурой со сравнительно большим периодом релаксации и конечной прочностью. При малых углах сдвиговой деформации структура жидкости остается неизменной, и обнаруживается область линейной упругости. При некотором критическом напряжении сдвига P_k , равновесная структура начинает разрушаться и происходит изменение ее механических свойств. Характерное критическое напряжение сдвига для суспензии 50 нм наночастиц $P_k = 1.46 \cdot 10^3$ Па, с увеличением размера наночастиц критическое напряжение сдвига уменьшается, так для второй суспензии с размерами наночастиц 100 нм $P_k = 0.45 \cdot 10^3$ Па.

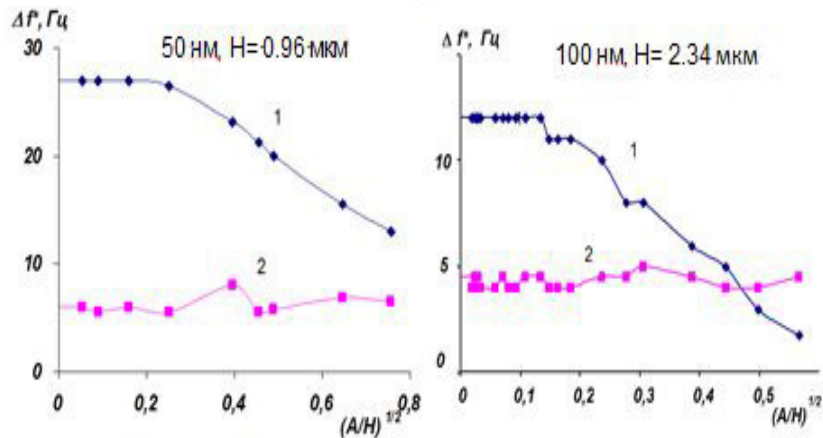


Рис.1. Зависимости действительного (1) и мнимого (2) сдвигов резонансной частоты от угла сдвиговой деформации для суспензий наночастиц $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c=1.25 \text{ мас.}\%$

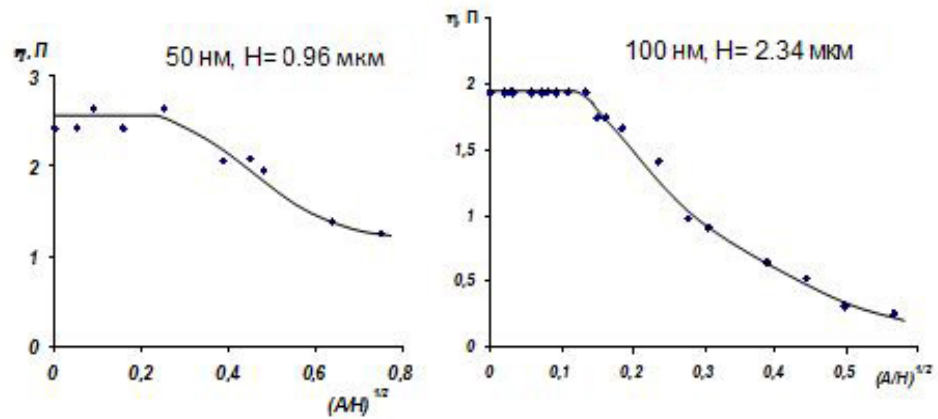


Рис.2. Зависимость эффективной вязкости от угла сдвиговой деформации для суспензий наночастиц $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c=1.25 \text{ мас.}\%$

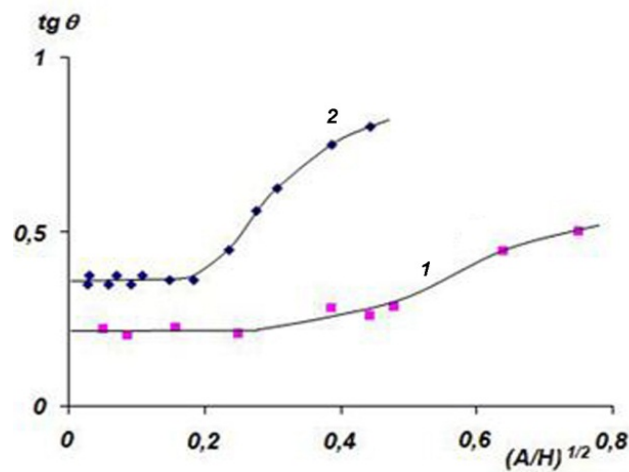


Рис.3. Зависимость тангенса угла механических потерь $\text{tg } \theta$ от угла сдвиговой деформации для суспензий наночастиц $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c=1.25 \text{ мас.}\%$ с размерами: 1 – 50 нм, 2 – 100 нм

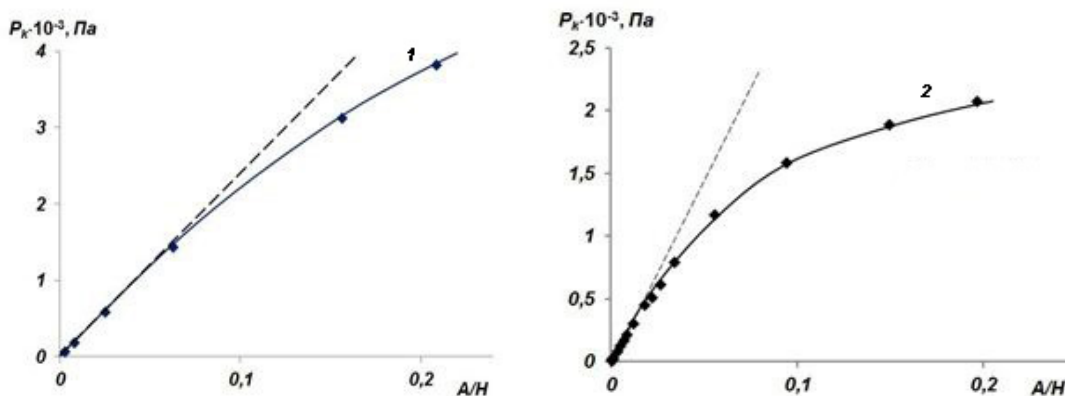


Рис. 4. Зависимость напряжения от величины сдвиговой деформации для суспензий SiO₂/ПЭС-2, с=1.25 мас.% с размерами: 1 – 50 нм, 2 – 100 нм

Изучение нелинейных вязкоупругих свойств суспензий в зависимости от величины сдвиговой деформации показало увеличение степени упорядоченности и прочности структуры наносуспензий с уменьшением размеров частиц. Результаты исследования вязкоупругих свойств коллоидных суспензий на основе полимерных смазочных материалов будут необходимы при разработке высокоэффективных консистентных смазочных средств, повышающих износостойкость и надежность машин и механизмов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН и частично поддержана грантом РФФИ (проект № 15-42-04319-р_сибирь_а).

Литература

1. Паренго О.П., Бакунин В.Н., Кузьмина Г.Н. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах // Рос.хим.ж. – 2003. –Т.47, № 2.– С. 45–50.
2. Кузьмин В.Н., Погодаев Л.И. Смазочные материалы с добавками [Электронный ресурс]. Трение, износ, смазка. –2009. –Т.11, № 1. – Режим доступа: <http://www.tribo.ru>.
3. Яхьяев Н.А., Бегов Ж.Б., Батырмурзаев Ш.Д. и др. Смазочная композиция для улучшения трибологических характеристик смазочного материала [Электронный ресурс]. Трение, износ, смазка. –2008. Т.10, № 3. – Режим доступа: <http://www.tribo.ru>.
4. Griersona D.S., Carpick R.W. Nanotribology of carbon-based materials//Nanotoday. – 2007. – V.2, N.5. – P. 12-21.
5. Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. Измерение сдвиговой упругости жидкостей и их граничных слоев резонансным методом // ЖЭТФ. 1966. Т.51, Вып. 4(10). С.969-981.
6. Badmaev V.B., Dembelova T.S., Damdinov B.B. Shear viscoelastic properties of liquids and their boundary layers. // Advances in Colloid and Interface Science 104(1-3), 299–305 (2003).
7. Badmaev V., Budaev O., Dembelova T. and Damdinov B. Shear elasticity of fluids at low-frequent shear influence // Ultrasonics 44, 1491-1494 (2006).
8. V.Badmaev, T.Dembelova, V.Damdinov, D.Makarova, O.Budaev, // Colloids and Surfaces A: Physicochem.Eng.Aspects 383, 90-94 (2011).
9. Бадмаев Б.Б., Макарова Д.Н., Сандитов Д.С., Дамдинов Б.Б., Дембелова Т.С. Низкочастотная вязкоупругая релаксация в жидкостях // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. №6. С.34-39.
10. Damdinov V.B., Dembelova T.S., Badmaev V.B., et al. Study of shear properties of nanoparticle suspensions // Procedia Chemistry 10, 2-6 (2014).

Сведения об авторах

Бадмаев Бадма Банзаракцаевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией физики молекулярных структур ИФМ СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; Телефон: +7(3012)432282; e-mail: lmf@ipms.bsnet.ru

Дембелова Туяна Сергеевна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИФМ СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; Телефон +7(3012) 432282; e-mail: tu_dembel@mail.ru

Макарова Дагзама Николаевна, научный сотрудник ИФМ СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; Телефон +7(3012) 432282; e-mail: dagzama@mail.ru

Цыренжапова Антонина Батоевна, младший научный сотрудник ИФМ СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; Телефон +7(3012) 432282; e-mail: lmf@ipms.bsnet.ru

Бадархаев Баир Васильевич, инженер ИФМ СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6;

Телефон +7(3012) 432282; e-mail: barik81@mail.ru