

Научная статья
УДК 621.762
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.036

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Сергей Владимирович Котомин¹, Антон Васильевич Митюков²

^{1,2}Институт Нефтехимического синтеза РАН, г. Москва, Россия

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

¹svk@ips.ac.ru, ¹servk@bmstu.ru

Аннотация

Исследовали деформационное поведение модельных высоконаполненных металлополимерных композиций из порошка алюминия в полиэтиленгликоле в условиях одновременного действия сжатия и сдвига. Показано, что модуль упругости при сжатии возрастает с повышением давления сжатия, при этом модуль сдвига существенно снижается. Обнаруженный эффект связан с перераспределением упругой полимерной прослойки между жесткими частицами наполнителя в нормальном направлении и в сдвиговой области. Предложена модель поведения высоконаполненных полимерных композиций.

Ключевые слова:

металло-полимерные суспензии, напряжение сдвига, модуль упругости, сжатие, пластичность

Благодарности:

профессору А. Я. Малкину за обсуждение результатов. Грант РФФ № 17-79-30108.

Для цитирования:

Котомин, С. В. Деформационные свойства высоконаполненных металлополимерных композиций / С. В. Котомин, А. В. Митюков // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 3. С. 198–202. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.036.

Original article

DEFORMATION PROPERTIES OF HIGHLY FILLED METAL-POLYMER COMPOSITIONS

Sergey V. Kotomin¹, Anton V. Mityukov²

^{1,2}V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹Bauman State Technical University, Moscow, Russia

¹svk@ips.ac.ru, ¹servk@bmstu.ru

Abstract

The deformation behavior of model highly filled metal polymer aluminum powder compositions in polyethylene glycol under simultaneous action of compression and shear studied. The compression module increases with the increase of the compression, wherein the shear module significantly reduces. The discovered effect is related to the redistribution of the elastic layer between the rigid particles of the filler in the normal direction and in the shear area. The model of behavior of highly filled polymer compositions in these conditions proposed.

Keywords:

metal-polymer suspensions, shear stress, compression, plasticity

Acknowledgments:

Prof. A. Ya. Malkin for discussing the results. RSF grant No. 17-79-30108.

For citation:

Kotomin, S. V. Deformation properties of highly filled metal-polymer compositions / S. V. Kotomin, A. V. Mityukov // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 198–202. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.036.

Введение

Развитие технологии получения металлических и керамических изделий из высоконаполненных полимерных композиций вызывает необходимость подробного изучения деформационного поведения подобных систем [1]. Реологические свойства суспензий ранее исследовали в широком диапазоне концентраций [2]. С ростом концентрации наполнителя поведение суспензий изменяется от типичной жидкости до упругопластичного тела. Было показано, что качественное изменение реологических свойств происходит при переходе концентрации наполнителя в области 55–65 об. %, соответствующей максимально возможно плотной упаковке частиц наполнителя в объеме. Упругопластичное поведение материалов описывается реологической моделью Прандтля, состоящей из упругой и пластичной

компонент и в которой малые напряжения вызывают упругие обратимые деформации, а при больших напряжениях развиваются пластические необратимые. При этом переход от упругого поведения к пластическому не является пределом текучести, изучению которого посвящено множество научных публикаций [3].

Исследованию поведения высоконаполненных материалов в условиях плоскопараллельного сжатия также посвящено много работ. В этих условиях материал подвергается сжатию между плоскопараллельными пластинами в узком зазоре, при котором возникают как сдвиговые, так и нормальные напряжения. Таким образом, исследовали как ньютоновские, так и вязкоупругие жидкости и пасты [4–6]. В высоконаполненных суспензиях наблюдается структурная анизотропия [7]. До настоящего времени поведение высоконаполненных суспензий в условиях одновременного сжатия и сдвига практически не изучалось, именно этому вопросу посвящена настоящая работа.

Результаты исследований

Исследовали модельную систему, состоящую из суспензии частиц алюминия в низкомолекулярном полиэтиленгликоле ПЭГ ($M = 400$) с вязкостью $0,11$ Па·с при температуре 25°C . Средний размер частиц Al составлял 24 мкм (плотность — 2700 кг/м³). Суспензии готовили механическим смешением порошка Al с ПЭГ. Исследования проводили на реометре RS-600 (Thermo Haake) при комнатной температуре $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Использовали измерительную ячейку с плоскопараллельными поверхностями диаметром 20 мм. Напряжение сдвига составляло 1 – 7 кПа, величина зазора — 2 мм. Нормальное напряжение σ_E варьировали в пределах 4 – 25 кПа. После приложения нормального давления производили его сброс с последующим восстановлением. Разница между начальным зазором и зазором после восстановления характеризовала необратимую деформацию. При сжатии также создавали сдвиговые напряжения вплоть до начала деформирования с последующим сбросом напряжения и восстановлением, после чего рассчитывали модуль упругости при сдвиге. Упругую и пластическую составляющую деформации рассчитывали по методике [2].

На рис. 1 показано фото узла реометра с образцом при испытании, на рис. 2 представлена зависимость изменения модуля упругости при сжатии от давления сжатия для композиций при содержании Al 55 и 60 об. %.



Рис. 1. Фотография узла реометра при испытании

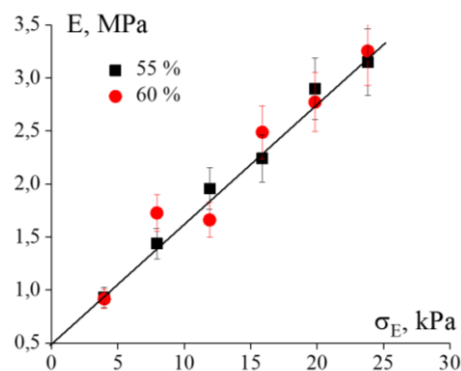


Рис. 2. Зависимость модуля упругости композиций при сжатии E от давления σ [8]

Модуль упругости при сжатии закономерно увеличивается благодаря сближению жестких частиц под давлением, сопровождаемым уменьшением толщины упругой полимерной прослойки с относительно низким модулем упругости.

Для твердых полимеров известно соотношение модулей сдвига и упругости в соответствии с уравнением

$$E = 2(1 + \mu)G,$$

где μ — коэффициент Пуассона, для твердых полимеров составляет около $0,5$.

Полученные экспериментальные данные характеризуют значение модуля упругости при сжатии $E \cong 5 \cdot 10^5$ Па и модуля при сдвиге для изученных суспензий $G \approx 1 \cdot 10^3$ Па и $G \approx 4 \cdot 10^4$ Па для концентраций 55 и 60 % соответственно, что значительно отличается от ожидаемого по приведенному выше уравнению.

В отличие от модуля при сжатии, для модуля упругости наблюдалось существенное уменьшение (на несколько порядков) модуля сдвига с ростом напряжения сдвига (рис. 3). Снижение модуля усиливается при повышении нормального давления. Это явление не проявляется при отсутствии нормального давления, когда модуль сдвига незначительно растет при увеличении напряжения сдвига, что является обычным при деформации гетерогенных материалов вследствие ориентационных эффектов.

Подобный эффект еще не был описан, и реологическая модель Прандтля для упругопластичного тела оказалась непригодна для его объяснения. Более того, для гетерогенных систем в направлении деформации модуль упругости обычно растет вследствие ориентации структуры [9–14]. Для объяснения этого явления предложено рассматривать изменение толщины и длины упругих связей между жесткими частицами при сдвиге за счет перераспределения дисперсионной среды в объеме, в результате чего модуль сдвига снижается при одновременном росте модуля при сжатии. Предлагаемая модель упруго-пластичного тела с изменяющимися упругими характеристиками представлена на рис. 4.

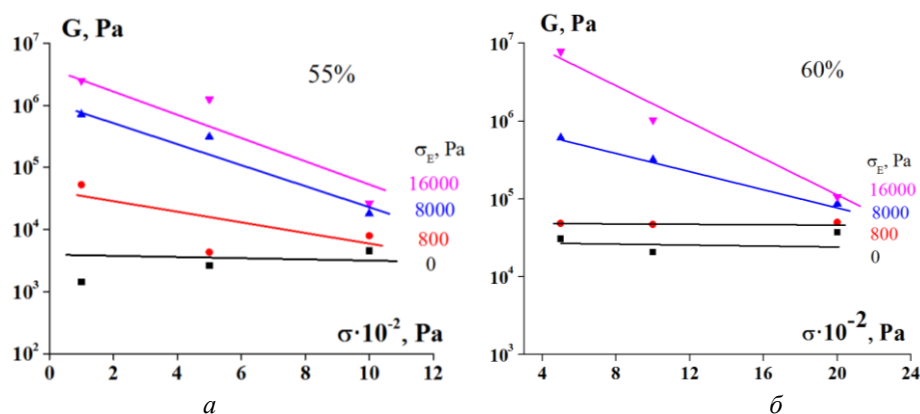


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига от напряжения сдвига с различным напряжением сжатия для суспензий с концентрацией 55 (а) и 60 (б) об. % [8]

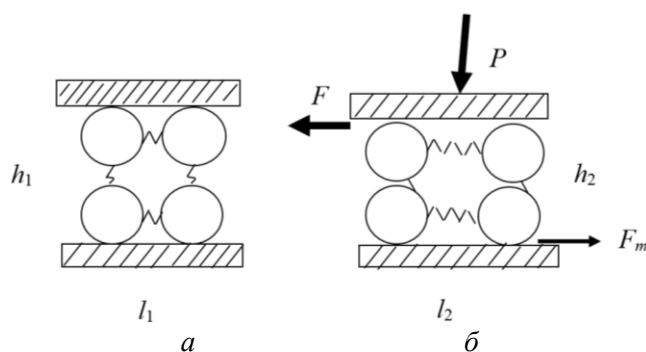


Рис. 4. Модель упруго-пластичного элемента с переменными упругими свойствами в исходном состоянии (а) и при приложении нормального давления и сдвиговой деформации (б): F — сдвиговая сила; $F_{тр}$ — сила трения, $F > F_{тр}$; P — нормальное давление; h_1, h_2 — расстояние между частицами в нормальном направлении; l_1, l_2 — расстояние между частицами в плоскости сдвига до и после деформации упругой связи соответственно, $h_1 > h_2$; $l_1 < l_2$

Согласно этой модели, при сжатии в нормальном направлении жесткие частицы наполнителя сближаются, выжимая полимерный слой между частицами. Этот слой затем при сдвиге распределяется между частицами в направлении сдвига, при этом длина упругой связи в этой плоскости растет, а модуль сдвига соответственно уменьшается.

Выводы

Высоконаполненные металлополимерные композиции, содержащие 55 и 60 об. % частиц алюминия, представляют собой упругопластичные системы с переменными упругими характеристиками, зависящими от нормальных и сдвиговых напряжений. Обнаружено существенное снижение модуля упругости при сдвиге в условиях одновременного воздействия сжатия и сдвига. Предложена модель, объясняющая поведение высоконаполненных суспензий при сжатии и сдвиге и изменение модуля сдвига за счет изменения длины и перераспределения упругих связей между частицами.

Список источников

1. Реологические свойства МИМ-фидстоков / С. В. Котомин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 1. С. 305. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.305-310.
2. Elasticity and plasticity of highly concentrated non-colloidal suspensions in shear / A. Ya. Malkin [et al.] // J. Rheology. 2020. doi:10.1122/1.5115558.
3. Malkin A., Kulichikhin V., Ilyin S. A modern look on yield stress fluids // Rheol. Acta. 2017. Vol. 56. P. 177–188.
4. Sherwood J. D., Durban D. Squeeze flow of a power-law viscoplastic solid // J. Non-Newton, Fluid mech. 1996. Vol. 62. P. 35–54.
5. A finite element analysis of the squeeze flow of an elasto-viscoplastic paste material / M. J. Adams [et al.] // J. Non-Newton Fluid Mech. 1997. Vol. 71. P. 41–57.
6. Roussel N., Lanos Ch. Plastic fluid parameters identification using a simple squeezing test // Appl. Rheol. 2003. Vol. 13, No. 3. P. 132–141.
7. Role of anisotropy in the elastoplastic response of a polygonal packing / F. Alonso-Marroquín [et al.] // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 71. P. 051304.
8. Deformation Properties of Concentrated Metal-in-Polymer Suspensions under Superimposed Compression / A. Ya. Malkin [et al.] // Polymers. 2020. Vol. 12, No. 5. P. 1038. doi:10.3390/polym12051038.
9. Self-organized domain microstructures in a plate-like particle suspension subjected to rapid simple shear / H. Kawabata [et al.] // Rheol. Acta. 2013. Vol. 52. P. 1–21.
10. Monsenti A., Peña A., Pasquali P. Vorticity Alignment and Negative Normal Stresses in Sheared Attractive Emulsions // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. P. 058303.
11. Coupling anisotropic viscosity and fiber orientation in applications to squeeze flow / E. Drew [et al.] // J. Rheology. 2019. Vol. 62. P. 669–679.
12. Local rheology of suspensions and dry granular materials / H. Cagny, de [et al.] // J. Rheology. 2015. Vol. 59. P. 957–969.
13. Shear banding and yield stress in soft glassy materials / C. F. Möller [et al.] // Phys. Rev. E. 2008. Vol. 77. P. 041507.
14. Miller J. A complex fluid exhibits unexpected heterogeneous flow // Physics Today. 2010. Vol. 63, No. 7. P. 18–19.

References

1. Kotomin S. V., Shabeko A. F., Frenkin E. I., Korotchenko A. Yu., Tverskoi M. V., Hilkov D. E. Reologicheskie svoystva MIM-fidstokov [Rheology of MIM-feedstocks]. *Trudy Kol'skogo NC RAN* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS], 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 305. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.305-310. (In Russ.).
2. Malkin A. Ya., Mityukov V., Kotomin S. V., Shabeko A. A., Kulichikhin V. G. Elasticity and plasticity of highly concentrated non-colloidal suspensions in shear. *Journal of Rheology*, 2020, doi:10.1122/1.5115558.
3. Malkin A., Kulichikhin V., Ilyin S. A modern look on yield stress fluids. *Rheology Acta*, 2017, Vol. 56, pp. 177–188.
4. Sherwood J. D., Durban D., Squeeze flow of a power-law viscoplastic solid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1996, Vol. 62, pp. 35–54.
5. Adams M. J., Aydin I., Briscoe B. J., Sinha S. K. A finite element analysis of the squeeze flow of an elasto-viscoplastic paste material. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1997, Vol. 71, pp. 41–57.
6. Roussel N., Lanos Ch., Plastic fluid parameters identification using a simple squeezing test. *Applied Rheology*, 2003, Vol. 13, No. 3, pp. 132–141.
7. Alonso-Marroquín F., Luding S., Herrmann H. J., Vardoulakis I. Role of anisotropy in the elastoplastic response of a polygonal packing. *Physical Review E*, 2005, Vol. 71, pp. 051304.
8. Malkin A. Ya., Kulichikhin V. G., Mityukov A. V., Kotomin S. V. Deformation Properties of Concentrated Metal-in-Polymer Suspensions under Superimposed Compression. *Polymers*, 2020, Vol. 12, pp. 1038, doi:10.3390/polym12051038.
9. Kawabata H., Nishiura D., Sakaguchi H., Tatsumi Y. Self-organized domain microstructures in a plate-like particle suspension subjected to rapid simple shear. *Rheology Acta*, 2013, Vol. 52, pp. 1–21.
10. Monsenti A., Peña A. A., Pasquali P. Vorticity Alignment and Negative Normal Stresses in Sheared Attractive Emulsions. *Physical Review Letters*, 2004, Vol. 92, pp. 058303.

11. Drew E., Sommer D. E., Favaloro A. J., Pipes R. B. Coupling anisotropic viscosity and fiber orientation in applications to squeeze flow. *Journal of Rheology*, 2019, Vol. 62, pp. 669–679.
12. Cagny H. de, Fall A., Denn M., Bonn G. Local rheology of suspensions and dry granular materials. *Journal of Rheology*, 2015, Vol. 59, pp. 957–969.
13. Møller C. F., Rodts S., Michels M. A., Bonn D. Shear banding and yield stress in soft glassy materials. *Physical Review E*, 2008, Vol. 77, pp. 041507.
14. Miller J. A complex fluid exhibits unexpected heterogeneous flow. *Physics Today*, 2010, Vol. 63, No. 7, pp. 18–19.

Информация об авторах

С. В. Котомин — доктор химических наук, ведущий научный сотрудник;

А. В. Митюков — научный сотрудник.

Information about the authors

S. V. Kotomin — Dr. Sc. (Chemistry), Senior Reseacher;

A. V. Mityukov — Researcher.

Статья поступила в редакцию 01.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.

The article was submitted 01.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.