

УДК 669.715:539.531

**ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОГО АЛЮМОМАТРИЧНОГО  
КОМПОЗИТА Al–7% Si + 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**© 2019 г. А. Б. Финкельштейн<sup>а,\*</sup>, О. А. Чикова<sup>а</sup>, М. Махмудзода<sup>а</sup>, В. В. Вьюхин<sup>а</sup><sup>а</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

\*e-mail: avinkel@mail.ru

Поступила в редакцию 03.08.2018

После доработки 14.08.2018

Принята к публикации 26.08.2018

Методом крутильных колебаний изучена кинематическая вязкость жидкого алюмоматричного композита (Al–7% Si + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), полученного методом продувки предварительно гидрогенизированного расплава кислородом, в сравнении с исходным сплавом. Фотометрическим методом выявлена доля оксидных частиц в алюминиевой матрице. Отмечено отсутствие ветвления политерма расплава композиционного материала, что связано с присущей ему микрогетерогенностью. Показана возможность прогнозирования вязкости композиционного материала по известным зависимостям с учетом осколочной формы частиц дисперсной фазы. Полученные данные можно использовать для расчета литниковых систем.

*Ключевые слова:* композиционный материал, частицы, дисперсионная среда, кинематическая вязкость, уравнение Эйнштейна, микрогетерогенность.

DOI: 10.1134/S0235010619040042

**ВВЕДЕНИЕ**

Алюмоматричные композиционные материалы (АМК) достаточно давно производятся методами порошковой металлургии [1, 2]. Но порошковая металлургия не позволяет получать изделия сложной конфигурации, что ограничивает их применение. Решить эту проблему позволяют жидкофазные технологии получения АМК, в основном представленные методом замешивания тугоплавких частиц TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN и др. в расплав [3, 4]. При введении тугоплавких частиц приходится преодолевать силы поверхностного натяжения расплава, образуя новую поверхность раздела фаз. Длительность процесса введения и распределения упрочняющей фазы в расплаве растет с уменьшением размера частиц. Альтернативой является образование тугоплавких частиц в расплаве в результате химической реакции, наиболее эффективно использовать реакцию окисления [5].

В работе [6] был показан способ формирования частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в жидком сплаве АК7, который заключается в насыщении расплава водородом с последующим продуванием кислорода, при этом в расплаве в результате разрушения оксидной пленки на поверхности кислородного пузыря образуются частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> характерным размером 100–200 нм [7], которые и повышают прочность за счет дисперсионного упрочнения. Полученный расплав заливается в литейную форму. Однако, насыщение расплава тугоплавкими частицами повышает его вязкость, что приводит к увеличению времени заполнения литейной формы, падению температуры поступающего по литниковой системе в полость формы расплава. Исследование вязкости расплава необходимо для корректирующего расчета литниковых систем для фасонного композиционного литья.

Таблица 1

## Химический состав сплава (мас. %)

Элемент	Al	Si	Mg	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn
Исходная шихта	90.223	6.212	0.584	0.084	0.305	1.05	0.688	0.573
Образцы	89.466	6.788	0.544	0.154	0.376	1.078	0.733	0.656

Таблица 2

## Доля оксида алюминия в АМК

Масса навески, мг	Масса оксида алюминия, мг	Доля оксида алюминия, мас. %	Доля оксида алюминия, об. %
161.64	8.3	5.1	3.5

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследовали образцы АМК, полученные методом литья по технологии [6] в лаборатории кафедры Литейного производства и упрочняющих технологий УРФУ. Химический состав слитка исходного сплава и образцов определяли методом эмиссионного спектрального анализа с использованием прибора SPECTROMAXx по среднему арифметическому трех образцов, он приведен в табл. 1. В лаборатории сплав нагревали в лабораторной шахтной печи сопротивления в алундовом тигле емкостью 800 см<sup>3</sup> до температуры 700°С. Расплав насыщали водородом путем введения гидрида титана в колокольчике с значительным превышением предела растворимости, затем продували кислородом в течение 1 ч через трубку из кварцевого стекла внутренним диаметром 8 мм и выливали в песчаную форму.

После затвердевания и охлаждения отливок отбирали образцы для металлографического, химического и вискозиметрического исследования.

Долю оксида алюминия определяли фотометрическим методом согласно ГОСТ 11739.1-90 в лаборатории кафедры общей химии УРФУ. Результаты представлены в табл. 2.

Кинематическую вязкость  $\nu$  измеряли методом крутильных колебаний тигля с расплавом [8] в одноторцевом варианте при отношении высоты образца к его диаметру  $\approx 1$  со ступенчатым изменением температуры 30 К. опыты проводили в атмосфере высококачистого гелия под давлением 10<sup>5</sup> Па в режиме нагрева от 600 до 1100°С, с последующим охлаждением образца. При проведении измерений регистрацию параметров колебаний осуществляли оптическим способом с помощью автоматической системы фоторегистрации. Систематическая погрешность измерения  $\nu$  составляла 3%, а случайная погрешность, определяющая разброс точек в ходе одного опыта, при доверительной вероятности  $p = 0.95$  не превышала 1.5%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения кинематической вязкости расплава исходного сплава и композиционного материала представлены на рис. 1, 2.

На рис. 3 представлено соотношение между вязкостью расплавов композиционного материала и исходного сплава.

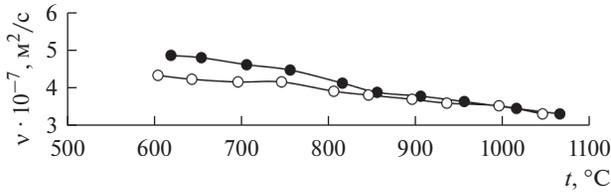


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости исходного сплава от температуры (● — нагрев; ○ — охлаждение).

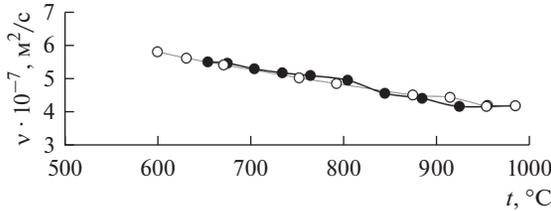


Рис. 2. Зависимость кинематической вязкости композиционного материала от температуры (● — нагрев; ○ — охлаждение).

Кинематическая вязкость исходного сплава (рис. 1) имеет ветвления политерм нагрева и охлаждения, полученные результаты близки данным [9]. В отличие от исходного сплава, кинематическая вязкость расплава композиционного материала (рис. 2) не характеризуется ветвлением политерм. Из рис. 3 видно, что соотношение вязкости композиционного материала и исходного сплава при нагреве варьируется в диапазоне 1.1–1.27 (среднее арифметическое 1.16) и имеет слабо выраженную зависимость от температуры, а при охлаждении зависимость от температуры присутствует. Полученные данные говорят о том, что повышение температуры расплава композиционного материала не приводит к его гомогенизации. Это может быть обусловлено условиями формирования композиционного материала, когда частицы оксида алюминия осаждаются на поверхности более тугоплавких компонентов [6], в дальнейшем механически блокируя гомогенизацию сплава. Расплаву композиционного материала присуща микрогетерогенность, и в качестве базы для расчета соотношения вязкостей следует брать кривую нагрева исходного сплава. В пользу этого положения говорит то, что соотношение вязкостей (1.16) не зависит от температуры. Флуктуации соотношения

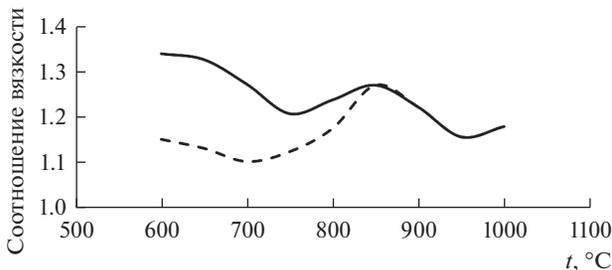


Рис. 3. Соотношение кинематической вязкости расплавов композиционного материала и исходного сплава (— охлаждение, --- нагрев).

вязкостей следует отнести к накоплению погрешности при измерений вязкости двух расплавов.

Для прогнозирования вязкости разбавленных суспензий используется уравнение Эйнштейна, связывающее соотношение вязкости суспензии и дисперсионной среды  $\eta/\eta_0$  с долей дисперсной фазы  $\varphi$ :

$$\eta/\eta_0 = 1 + \alpha\varphi + \beta\varphi^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, причем коэффициент  $\beta$  используется для описания вязкости суспензий в диапазоне концентраций 0.04–0.1 и характеризует взаимодействие частиц между собой. Расчет при значении коэффициентов для разбавленной суспензии ( $\varphi < 0.04$ ) сферических частиц показал значения вязкости, существенно отличающиеся от экспериментальных данных (1.0875 против 1.16).

При этом расхождение химического состава сплава крайне незначительно и связано с технологией производства композиционного материала, при которой образуется летучие субоксиды алюминия, в результате чего доля алюминия в расплаве незначительно снижается, что, согласно данным [9], приводит не к повышению, а к снижению вязкости дисперсионной среды относительно исходного сплава.

Одной из причин увеличения вязкости композиционного материала является отличия формы частиц от изотропной. Их образование происходит в результате разрушения оксидной пленки, поэтому частицы оксида алюминия имеют форму пластин. Для частиц неправильной формы коэффициент  $\alpha$  в уравнении Эйнштейна варьируется в зависимости от соотношения диаметра к толщине в широком диапазоне [10].

Другой причиной повышения вязкости является остроугольная форма частиц, как продукта разрушения оксидной пленки. В работе [11] приведен расчет по уравнению Стокса в зависимости от формы частиц, в частности для частиц кубической формы скорость движения при одинаковом объеме уменьшается на 24%.

Превышение экспериментальных данных над теоретическим расчетом наблюдалось и в других работах, посвященных исследованию вязкости алюминиевых композитов, полученных методом замешивания частиц в расплав [12–15]. При изотропной форме частиц в работе [12] уравнение Эйнштейна было модифицировано в виде:

$$\eta/\eta_0 = 1 + \alpha\varphi + \beta\varphi^2 + e^{AB}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 2.5$ ;  $\beta = 10.5$ ;  $A = 0.0023$ ;  $B = 16.6$ . Эта модификация существенно отличается как по форме, так и коэффициенту  $\beta$  от данных обобщающих работ, посвященных исследованию неметаллических суспензий [16]. Отличие обусловлено осколочной формой частиц дисперсной фазы. Расчет по предлагаемой в работе [12] формуле при заданном значении дает соотношение вязкостей 1.14, что близко к полученному экспериментально (1.16). Следует отметить, что в работе [12] объемная доля частиц твердой фазы была выше – 10%, но критическая доля частиц твердой фазы, при которой наблюдается их взаимодействие между собой, связано с их формой. Поэтому при осколочной форме частиц доля, при которой можно использовать коэффициент  $\beta$  в уравнении Эйнштейна, может быть снижена относительно уровня 4%, рекомендуемого в [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально определена кинематическая вязкость композиционного материала, полученная методом продувки предварительно гомогенизированного расплава алюминиевого сплава кислородом. Показана возможность прогнозирования кинематической вязкости композиционного материала. Полученные значения вязкости могут быть использованы для расчета литниковых систем при компьютерном моделировании литейных процессов.

Работа была поддержана в рамках научных исследований высших учебных заведений Российской Федерации по государственному заданию № 4.9541.2017/8.9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стерин И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки: учеб. пособие СПб. : Политехника, 2003.
2. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учеб. для техн. Вузов. М.: Альянс, 2009.
3. Lindroos V. K., Talvitie M. J. // J. Material Processing Technology. 1995. **53**. № 1–2. P. 273–284.  
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01985-N](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01985-N)
4. Hashim J., Looney L. and Hashmi M. S. J. // J. Materials Processing Technology. 1999. **92–93**. P. 1–7.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00118-1)
5. Wang Y., Li H. T., Fan Z. // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2012. **65**. № 6. P. 653–661.  
<https://doi.org/10.1007/s12666-012-0194-x>
6. Finkelstein A. B., Schaefer A., Chikova O. A. // Acta Metallurgica Slovaca. 2017. **23**. № 1. P. 4–11.  
<http://dx.doi.org/10.12776/ams.v23i1.808>
7. Chikova O. A., Finkel'shtein A. B., Shefer A. A. // Physics of Metals and Metallography. 2018. **119**. № 7. P. 685–690.  
<https://doi.org/10.1134/S0031918X18070037>
8. Zhu P., Lai J., Shen J., Wu K., Zhang L., Liu J. An oscillating cup viscometer based on Shvidkovskiy algorithm for molten metal's // Measurement: J. International Measurement Confederation. 2018. **122**. P. 149–154
9. Chikova O. A., Nikitin K. V., Moskovskikh O. P., Tsepelev V. S. // Acta Metallurgica Slovaca. 2016. **22**. № 3. P. 153–163.  
<http://dx.doi.org/10.12776/ams.v22i3.774>
10. Фортъе А. Механика суспензий. М.: Мир, 1971.
11. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976.
12. Sozhamannan G. G., Balasivanandha Prabu S., Venkatagalapathy V. S. K. Effect of processing paramters on metal matrix composites: stir casting process // JSEMAT. 2012. **2**. № 1. P. 11–15.
13. Wang J., Guo Q., Nishio M., Ogawa H., Shu D., Li K., He S., Sun B. // J. Materials Processing Technology. 2003. **136**. № 1–3 P. 60–63.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00919-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00919-6)
14. Ravi K. R., Pillai R. M., Amaranathan K. R., Pai B. C., Chakraborty M. // J. Alloys and Compounds. 2008. **456**. № 1–2. P. 201–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.038>
15. M. Ł agiewka. Selected the casting properties of the composite AlMg10 + C<sub>gr</sub> // Arch. Metall. Mater. 2017. **62**. № 3. P. 1585–1589
16. Laskowski J. S. Coal flotation and fine coal utilization. Amsterdam Elsevier, 2001.
17. Braaten O., Kjekshus A., Kvande H. // J. Minerals, Metals & Materials Society. **52**. № 2. P. 47–53.  
<https://doi.org/10.1007/s11837-000-0047-7>

### Viscosity of Liquid Alumentric Composite Al–7% Si + 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

*A. B. Finkelstein<sup>1</sup>, O. A. Chikova<sup>1</sup>, M. Makhmudzoda<sup>1</sup>, V. V. V'yukhin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

The kinematic viscosity of a liquid aluminum matrix composite (Al–7% Si + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) obtained by the method of purging a pre-hydrogenated melt with oxygen was studied using the method of torsional vibrations in comparison with the initial alloy. The photometric method

revealed the proportion of oxide particles in the aluminum matrix. The absence of branching of polytherm melt composite material, which is associated with its inherent microheterogeneity. The possibility of predicting the viscosity of a composite material from known dependencies is shown, taking into account the fragmentation shape of the particles of the dispersed phase. The obtained data can be used to calculate the gating systems.

*Keywords:* composite material, particles, dispersion medium, kinematic viscosity, Einstein equation, microheterogeneity

## REFERENCES

1. Sterin I.S. Mashinostroitel'nyye materialy. Osnovy metallovedeniya i termicheskoy obrabotki [Engineering materials. Fundamentals of metallurgy and heat treatment: studies]: ucheb. posobiye SPb.: Politehnika, 2003. (in Russian).
2. Lakhtin Yu.M., Leont'yeva V.P. Materialovedeniye: ucheb. dlya tekhn. vuzov [Materials science: studies. for tech. universities]. Moskva: Al'yans, 2009. (in Russian).
3. Lindroos V.K., Talvitie M.J. // J. Material Processing Technology. 1995. **53**. № 1–2. P. 273–284.  
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01985-N](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01985-N)
4. Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J. // J. Materials Processing Technology. 1999. **92–93**. P. 1–7.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00118-1)
5. Wang Y., Li H.T., Fan Z. // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2012. **65**. № 6. P. 653–661.  
<https://doi.org/10.1007/s12666-012-0194-x>
6. Finkelstein A.B., Schaefer A., Chikova O.A. // Acta Metallurgica Slovaca. 2017. **23**. № 1. P. 4–11.  
<http://dx.doi.org/10.12776/ams.v23i1.808>
7. Chikova O.A., Finkel'shtein A.B., Shefer A.A. // Physics of Metals and Metallography. 2018. **119**. № 7. P. 685–690.  
<https://doi.org/10.1134/S0031918X18070037>
8. Zhu P., Lai J., Shen J., Wu K., Zhang L., Liu J. An oscillating cup viscometer based on Shvidkovskiy algorithm for molten metal's // Measurement: J. International Measurement Confederation. 2018. **122**. P. 149–154.
9. Chikova O.A., Nikitin K.V., Moskovskikh O.P., Tsepelev V.S. // Acta Metallurgica Slovaca. 2016. **22**. № 3. P. 153–163.  
<http://dx.doi.org/10.12776/ams.v22i3.774>
10. Fort'ye A. Mekhanika suspenziy [Mechanics of suspensions]. M.: Mir, 1971. (in Russian).
11. Khappel, Dzh. Brenner G. Gidrodinamika pri malykh chislakh Reynol'dsa [Hydrodynamics at low Reynolds numbers]. M.: Mir, 1976. (in Russian).
12. Sozhamannan G.G., Balasivanandha Prabu S., Venkatagalapathy V.S.K. Effect of processing paramters on metal matrix composites: stir casting process // JSEMAT. 2012. **2**. № 1. P. 11–15.
13. Wang J., Guo Q., Nishio M., Ogawa H., Shu D., Li K., He S, Sun B. // J. Materials Processing Technology. 2003. **136**. № 1–3. P. 60–63.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00919-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00919-6)
14. Ravi K.R., Pillai R.M., Amaranathan K.R., Pai B.C., Chakraborty M. // J. Alloys and Compounds. 2008. **456**. № 1–2. P. 201–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.038>
15. M. Łagiewka. Selected the casting properties of the composite AlMg10 + C<sub>gr</sub> // Arch. Metall. Mater. 2017. **62**. № 3. P. 1585–1589.
16. Laskowski J.S. Coal flotation and fine coal utilization. Amsterdam Elsevier, 2001.
17. Braaten O., Kjekshus A., Kvande H. // J. Minerals, Metals & Materials Society. **52**. № 2. P. 47–53.  
<https://doi.org/10.1007/s11837-000-0047-7>