

- composites. *Vestnik of Voronezh State Technical University*. 2015. Vol. 18, No. 5. pp. 100–107.
10. Zagidullin A. I., Garipov R. M., Khasanov A. I., Efremova A. A. Effect of the multilayer film structure on the barrier properties of a polymer film material. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. No. 14. pp. 151–153.
11. Syrkov A. G. The tribochemical properties of copper synergetically changing in the presence of quaternary compounds of ammonium on the surface. *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85, No. 6. pp. 1043–1045.
12. Syrkov A. G., Taraban V. V., Kabirov V. R., Silivanov M. O. Stabilization of disperse metals by nitrogen-containing tensides with different-sized molecules. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1313. 012052.
13. Syrkov A. G., Bazhin V. Yu., Mustafaev A. S. U. Nanotechnology and nanomaterials. Aspects of physics and mineral raw materials. St. Petersburg: Politekh-Press, 2019. 244 p.
14. New Materials. Preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology. Ed. A. G. Syrkov, K. L. Levine. New York: Nova Science Publishers, 2020. 248 p.
15. Alekseeva O. K., Fateev V. N. Application of ion magnetron sputtering for the synthesis of nanostructured electrocatalysts (Review). *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2015. No. 7. pp. 14–36.
16. Gorbunova E. K., Tazekov B. A., Boytsov V. G. et al. Method of making film piezoelectric cells. Certificate of authorship, SU 777885. No. 2714101. Applied: 11.12.1978. Published: 07.11.1980. Bulletin No. 41.
17. Official website of the Research Institute of Precision Machine Manufacturing (NIITM). Available at: <http://www.niitm.ru> (Accessed: 31.02.2023).
18. Odinokov V. V., Karakulov R. A., Panin V. V., Kachan N. O. Deposition of multi-layer coatings as part of the process of making energy output elements of microwave devices using vacuum units of the MAGNA TM type. *Vacuum Technology-2022: Conference proceedings*. 21–23 June 2022. St. Petersburg: Izdatelstvo SPbGETU “LETI”, 2022. pp. 244–248.
19. Ivanov A. A. Multi-layer nanocomposite ferroelectric films in microwave devices: Extended abstract of doctoral dissertation. Saint Petersburg, 2018. 30 p.
20. Zinoviev A. V., Piskarev M. S., Skryleva E. A. et al. Effect of plasma processing on the properties and structure of poly(vinyltrimethylsilane) films. *Vacuum Technology-2022: Conference proceedings*. 21–23 June 2022. St. Petersburg: Izdatelstvo SPbGETU “LETI”, 2022. pp. 183–186.
21. Balashov V. M., Mironenko I. G., Ivanov A. A. et al. Technology and dielectric properties of multi-layer nanocomposite ferroelectric films. *Voprosy radioelektroniki*. 2018. No. 1. pp. 62–67.
22. Margolin V. I., Toisev V. N., Tupik V. A. et al. Device for depositing thin film coatings. Patent RF, No. 194223. No. 2019124953. Applied: 05.08.2019. Published: 03.12.2019. Bulletin No. 34.
23. Tupik V. A., Toisev V. N., Starobinets I. M. et al. Device for applying a metal coating on a piezofilm using a vacuum-plasma method. Patent RF, No. 2768679. No. 2021123473. Applied: 06.08.2021. Published: 24.03.2022. Bulletin No. 9.
24. Khrustaleva I. N., Lyubomudrov S. A., Larionova T. A., Brovkina A. Yu. Improved preproduction planning efficiency for the manufacturing of mining equipment components. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 417–426.
25. Baake E., Shpenst V. A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 660–668.
26. Konchus D. A., Sivenkov A. V. A Surface structure formation of stainless steel using a laser. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1022. pp. 126–132.
27. Popova A. N., Klimeikov B. D., Grabovskiy A. K. Mining University's plasma nanotechnology and energy school. *Izvestiya VUZOV. Applied Nonlinear Dynamics*. 2021. Vol. 29, No. 2. pp. 317–336.
28. Pryakhin E. J., Ligachev A. E., Kotobov Y. R. et al. Assessment of the thermal effect on the surface of metal structural materials on the stability of laser — induced code readability. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 47–54.
29. Popova A. N., Kison V. E., Sukhomlinov V. S., Mustafaev A. S. Development of New Plasma Technology Method in Synthetic Materials. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1040. pp. 87–93.

Улучшение свойств полимерной эпоксидной матрицы добавками наноксидов алюминия и кремния

УДК [539.61+544.72]:620.3



В. В. Сызранцев,
директор НИЦКП «Нанотехнологии и наноматериалы»,
канд. физ.-мат. наук,
эл. почта: vvveliga@mail.ru

Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М. Д. Миллионщикова,
Грозный, Россия

Проведено сравнительное исследование упрочнения композитов при внедрении в них наночастиц SiO_2 и Al_2O_3 , которые были получены четырьмя разными способами. Анализировали изменения модуля упругости образцов и скорости восстановления дефекта, вызванного вдавливанием четырехугольной алмазной пирамидки по методу Виккерса. Показано, что использование частиц, синтезированных разными методами, при сохранении их химического состава и размера приводит к структурным изменениям в композите.

При допировании в эпоксидную смолу наночастиц SiO_2 и Al_2O_3 , полученных разными способами, общая картина упрочнения материала сохраняется, а рост и снижение его модуля упругости происходит при разных их концентрациях.

Анализ процесса восстановления образцов после микровдавливании показал улучшение «залечивания» микродефектов поверхности у модифицированного композита по сравнению с исходным материалом. А при концентрации наночастиц от 0,5 до 2,0 % (в зависимости от метода их синтеза) происходит полное восстановление отпечатка. Кроме того, для восстановления образцов требовалось разное время — от 30 до более 90 с при допировании разными частицами. Описанные структурные изменения композита происходят похожим образом при допировании как наночастиц Al_2O_3 , так и SiO_2 . Установлено, что наиболее быстрый эффект восстановления обеспечивают наночастицы, полученные пирогенным методом, а замедленный — жидкофазным синтезом. Вероятной причиной такой вариативности упрочняющего эффекта наночастиц является разная активность (сила и состав активных центров) их поверхности, формируемая при разных условиях синтеза. Эта особенность делает затруднительным непосредственное сравнение характеристик композита, вызванных наполнителями, которые получены при разных условиях, хотя и имеют одинаковый химический и структурный состав.

Ключевые слова: наноксиды алюминия и кремния, композиты, наночастицы, активные центры поверхности, остаточная деформация, метод Виккерса, структура композита.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.06

Введение

В настоящее время композиты, содержащие оксиды цветных металлов или соединения кремния, используются во многих отраслях промышленности, в том числе при производстве сплавов, батарей, керамики, клеев, антифрикционных материалов, в биомедицине [1, 2]. Включение в состав материалов разных наполнителей [3, 4] может значительно изменить их механическую прочность [5–10], термо- и электропроводность [11], термоустойчивость [12], магнитные [13, 14] и другие характеристики [15–22]. Свойства таких композитов зависят от размера, формы, природы частиц, взаимодействия между ними, распределения их в матрице [23, 24]. Например, эпоксидные полимеры имеют ковалентные связи, соединяющие полимерные цепи вместе, образуя сшитую структуру. Наличие других типов молекулярных взаимодействий, таких как водородная связь, также может влиять на свойства формируемого композита [25].

Особенность нанодобавок состоит в определяющей роли их поверхности, которая представляет собой комплекс активных центров [26, 27]. Улучшающие эффекты могут иметь разную силу и вид при использовании химически одинаковых частиц в сочетаниях с разными матрицами или разных частиц с одной и той же матрицей.

Известно, что процесс модификации материала наночастицами в целом можно представить как влияние частиц на структуру матрицы жестких связей, ее морфологию и локальную плотность (механический аспект) и на увеличение числа химических связей, вызванное внесением частиц (химический аспект). Рассматриваемая далее вариация свойств поверхности, вызванная изменением условий и методов синтеза наполнителя, может значительно изменять величину химического аспекта его взаимодействия с матрицей.

Было показано, что при разных методах синтеза формируются наночастицы со значительной разницей в силе активных центров их поверхности при сохранении химического и фазового состава материала [28–32]. Прогноз межфазного взаимодействия материалов может быть сделан на основе сравнения кислотно-основных свойств соединяемых материалов по эмпирическим уравнениям Оуэнса – Вендта (Owens – Wendt) и ван Осса – Чоудхури – Гуда (van Oss – Chaudhury – Good) [33].

Также была прослежена связь между типами поверхностных центров, их силой и взаимодействием наночастиц с дисперсионной средой. В частности, наблюдали значительную разницу в силе активных центров для исследованных образцов, которая отразилась на реологии наножидкостей на основе эпоксидной смолы и воды [34].

В представленной статье проанализировано влияние вариации поверхности наночастиц Al_2O_3 , SiO_2 на прочностные характеристики композита на основе отвержденной эпоксидной смолы.

Методики исследования

Наночастицы были синтезированы разными методами:

- SiO_2 , Al_2O_3 — испарением материала электронным пучком — обозначены как *Ts*, *Ta* соответственно; пироженным способом (Evonik Industries, Германия) — *As*, *Aa*; жидкофазным методом (Nanjing XFANO Materials Tech Co., Китай) — *Ls*, *La*;

- SiO_2 — плазменно-дуговым способом (Plasmotherm (Россия)) — *Ps*;

- Al_2O_3 — электрическим взрывом проволочки («Перспективные материалы», Россия) — *Ea*.

Все частицы диоксида кремния — ренгеноаморфны. Образцы *Aa* и *Ta* — гамма-фаза Al_2O_3 , а *La*, *Ea* — альфа-фаза. Все частицы имели практически сферическую форму и диаметр ~25 нм.

В качестве основы использовали эпоксидную смолу ЭД-20 (PolyMax, Россия). После допирования в нее наночастиц суспензию подвергали воздействию ультразвука в течение 30 мин для деагломерации частиц. После этого добавляли отвердитель ПЭПА в соотношении 1:10 к массе смолы. Отверждение проходило в течение 24 ч при комнатной температуре.

Образцы подвергали микротвердотверждению на микротвердомере HVS-1000A с четырехугольной алмазной пирамидой по Виккерсу (угол при вершине 136° , масса 200 г, продолжительность воздействия 20 с). После вдавливания композиты помещали на 15, 30, 90, 300 с на горячую пластину при заданной температуре, а затем фотографировали. Используемые температуры составляли 20, 60, 70, 75 и 80 °С, наилучший эффект «залечивания» наблюдали при температуре образца 75 °С.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены экспериментально полученные зависимости модуля упругости отвержденной смолы от концентрации внедренных наночастиц. В целом характер привносимых частицами изменений одинаков: с увеличением их концентрации до некоторого значения растет модуль упругости, а после достижения максимума он снижается до исходной величины или ниже. При этом максимум модуля упругости композитов расположен при разных концентрациях наночастиц. Вероятно, это происходит из-за разной силы поверхностных центров, которые создают дополнительные связи между частицами и молекулами полимера [28, 35]. В результате возникает дополнительная структурная сетка, приводя к упрочнению материала. С увеличением концентрации допированных частиц число упрочняющих связей растет, достигая максимума, когда использованы все свободные связи полимера. При дальнейшем увеличении концентрации возникают вынужденные связи непосредственно между наночастицами (агломерация), которые значительно слабее, чем связи между полимером и частицами. Важно отметить, что число и сила дополнительных связей

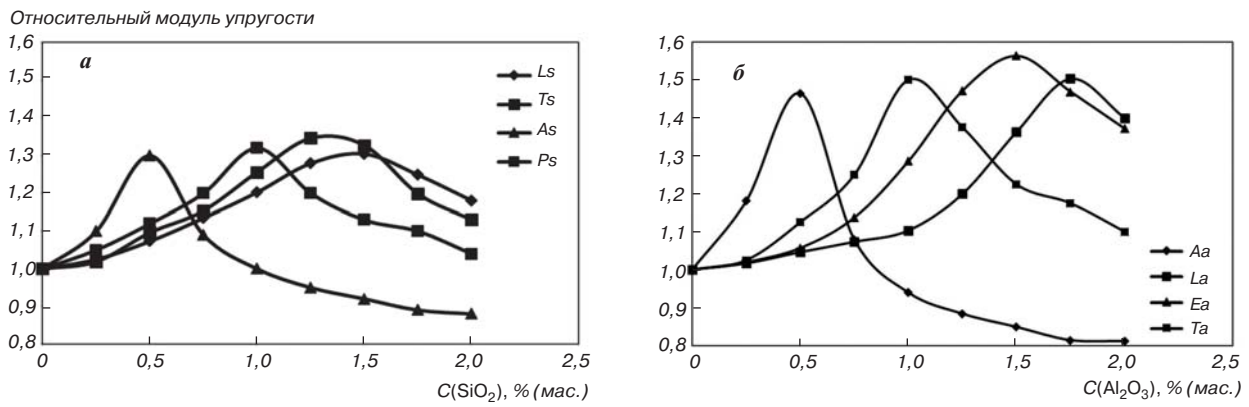


Рис. 1. Зависимости модуля упругости композитов, содержащих наночастицы SiO_2 (а) и Al_2O_3 (б) от их концентрации

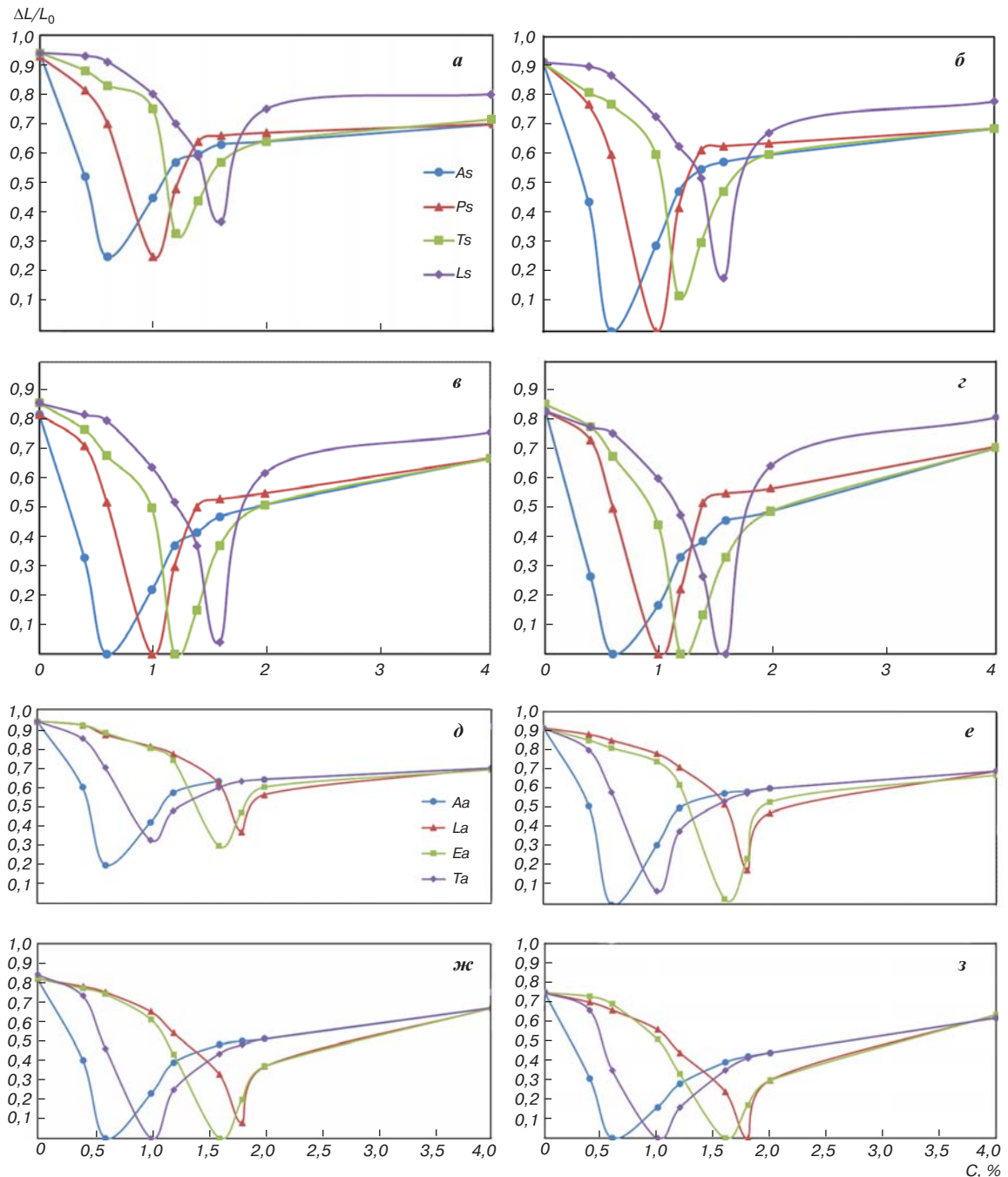


Рис. 2. Остаточная деформация $\Delta L/L_0$ композитов, содержащих SiO_2 (а–г) и Al_2O_3 (д–з) в зависимости от их концентрации спустя 15 (а, д), 30 (б, е), 90 (в, ж) и 300 (з, з) секунд после снятия деформации

полимер – наночастицы зависят от активности поверхности наночастиц [28, 36, 37] и меняются в зависимости от метода их синтеза.

Наиболее быстро эффект упрочнения среди диоксида кремния создают частицы *As*, имеющие, как показал анализ ИК-спектров [28, 38], сильные льюисовские кислотные центры. А наиболее замедленный эффект показывают частицы *Ls*, поверхность которых обладает только брэнстедовскими основными центрами. В случае композитов, содержащих наночастицы Al_2O_3 , частицы *Aa*, имея более активную поверхность, быстрее упрочняют композит, чем другие. В свою очередь, *La* имеют самую пассивную поверхность при самой большой концентрации частиц [28].

На рис. 2 показано уменьшение остаточной деформации ΔL относительно начального вдавливания L_0 с течением времени восстановления отпечатка после микровдавливании. Из полученных данных можно заключить, что добавление наночастиц значительно улучшает «залечивание» микровдавливании. При этом частицы каждого вида проявляют собственный эффект, в динамике отраженный на рис. 2. Наиболее быстрое восстановление среди композитов с SiO_2 создают частицы *As* и *Ps*, для которых полное «залечивание» происходит уже после 30 с. Образец *Ls* полностью восстанавливает дефект только за 300 с. То есть взаимодействие частица – смола имеет разное значение для частиц, разного происхождения. Нужно также отметить, что, как и в случае с модулем Юнга, максимальный эффект возникает только при некоторой концентрации, исчезая при ее превышении. Концентрация максимального эффекта и порядок сила взаимодействия смола – частица совпадает с данными модуля Юнга.

Подобное поведение композитов наблюдается и у образцов с Al_2O_3 : частицы *Aa* упрочняют композит быстрее и при меньшей концентрации, чем другие частицы, а частицы *La* — медленнее всего и при самой большой концентрации. Интересно отметить, что образцы с *Ea* достигают максимального эффекта быстрее, чем с *Ta*, но требуют для этого большей концентрации, что отличает их от других исследованных наночастиц.

Исследованные эффекты — максимальное восстановление после деформации и усиление модуля упругости — имеют одинаковую природу, связанную со структурным изменением материала. Этот процесс определяется силой активных центров поверхности дисперсной фазы и интенсивностью связи групп O – Si или O – Al, которые ранее были определены с помощью ИК-спектроскопии [38]. В конечном счете этот фактор регулирует концентрацию, при которой достигается максимальный эффект упрочнения.

Таким образом, на примерах упрочнения и кинетики деформирования композита при его допировании наноксидом алюминия и кремния было показано, что эффект от наночастиц, имеющих одинаковый химический состав, фазовую структуру и распределение по размерам, зависит от активности их поверхности, которая определяется условиями синтеза. Такая особенность делает затруднительным непосредственное сравнение характеристик композита, вызванных разными наполнителями. Это необходимо учитывать при разработке технологических процессов и контроля качества серийного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. pp. 34–38
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.06

PROPERTIES OF POLYMER EPOXY MATRIX ENHANCED WITH NANOOXIDES OF ALUMINIUM AND SILICON

Information about authors

V. V. Syzrantsev, Director of the Nanotechnology and Nanomaterials Research Centre¹, Candidate of Physics & Mathematics Sciences, e-mail: vvveliga@mail.ru

¹Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.

Abstract

This paper describes a comparative study of composites that are strengthened with SiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles obtained by four different methods. The author analyzed how the elastic modulus of specimens changed, as well as the recovery rate of the defect produced by the indentation of a quadrangular diamond pyramid under the Vickers method. It is shown that the use of particles synthesized in different ways leads to structural changes in the composite, provided their chemical composition and size remain unchanged.

When epoxy resin is doped with SiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles obtained in different ways, the strengthening of the material follows the same general pattern, while its modulus of elasticity can rise or drop depending on their concentrations. Analysis of the recovery process following microindentation showed that the doped composite manifests better healing of surface microdefects compared

with the original material. And the concentration of nanoparticles of 0.5 to 2.0% (depending on the synthesis technique used) is associated with a complete recovery of the indent. Besides, depending on the particles chosen for doping, different specimens required different recovery time — from 30 to more than 90 seconds. The described structural changes follow a similar pattern when doping with both Al_2O_3 and SiO_2 nanoparticles. It was found that the fastest recovery effect is secured by pyrogenic nanoparticles, while the slowest one — by particles produced by liquid-phase synthesis. The probable cause of such variability in the strengthening effect of nanoparticles is their different surface activity (i.e. the strength and composition of active centers), which can differ depending on the synthesis conditions. This peculiarity makes it difficult to directly compare the characteristics of the composite associated with fillers obtained under different conditions, even when they have the same chemical and structural composition.

Key words: aluminium and silicon nanooxides, composites, nanoparticles, active surface sites, permanent deformation, Vickers method, composite structure.

References

- Liang J. Z. Reinforcement and quantitative description of inorganic particulate-filled polymer composites. *Composites Part B*. 2013. Vol. 51. pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.03.019.
- Takahashi S., Imai Y., Kan A., Hotta Y. et al. Dielectric and thermal properties of isotactic polypropylene/hexagonal boron nitride composites for high-frequency applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 615. pp. 141–145. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.138.
- Bailey E. J., Winey K. I. Dynamics of polymer segments, polymer chains, and nanoparticles in polymer nanocomposite melts: A review. *Progress in*

- Polymer Science* 2020. Vol. 105, No. 7. 101242. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2020.101242.
4. New materials: preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2020. 247 p.
 5. Alattar A. L., Nikitina L. N., Bazhin V. Yu. Enhanced physical and mechanical properties of aluminium alloys reinforced with boron carbide particles. *Elektro metallurgiya*. 2022. No. 7. pp. 13–22. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-663-671.
 6. Mohandes J. A., Refahi A., Meresht E. S., Berenji S. Effect of temperature and particle weight fraction on mechanical and micromechanical properties of sand-polyethylene terephthalate composites: a laboratory and discrete element method study. *Composites Part B*. 2011. Vol. 42, No. 6. pp. 1461–1467.
 7. Prokopchuk N. R., Globa A. I., Laptik I. O., Syrkov A. G. The properties of metal coatings enhanced with diamond nanoparticles. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 6. pp. 50–54.
 8. Alattar A. L., Bazhin V. Y. Al–Cu–B₄C composite materials for the production of high-strength billets. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64, No. 5-6. pp. 566–573. DOI: 10.1007/s11015-020-01028-2.
 9. Savchenko S., Kosov Y., Bazhin V., Krylov K. et al. Microstructural master alloys features of aluminum-erbium system. *Crystals*. 2021. Vol. 11, No. 11. 1353. DOI: 10.3390/cryst11111353.
 10. Skrebnev V. I., Serjan S. L., Kalugina E. V. Research of resistance to water-jet wear of plastic and steel pipes. Assessment of the main parameters that affect the wear rate of hydraulic transport systems. *Plasticheskie massy*. 2020. No. 9-10. pp. 40–44. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-40-44.
 11. Tanaka T., Kozako M., Okamoto K. Toward high thermal conductivity nanomicro epoxy composites with sufficient endurance voltage. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2012. Vol. 2, No. 1. pp. 90–98. DOI: 10.5370/JICEE.2012.2.1.090.
 12. Bikiaris D. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part II: an overview on thermal decomposition of polycondensation polymers. *Thermochimica Acta*. 2011. Vol. 523, No. 1. pp. 25–45. DOI: 10.1016/j.tca.2011.06.012.
 13. Peinado F. et al. Open-grade wearing course of asphalt mixture containing ferrite for use as ferromagnetic pavement. *Composites Part B*. 2014. Vol. 57. pp. 262–268.
 14. Hunyek A., Sirisathitkul C. Electromagnetic and dynamic mechanical properties of extruded cobalt ferrite-polypropylene composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2011. Vol. 50, Iss. 6. pp. 593–598. DOI: 10.1080/03602559.2010.543743.
 15. Kamanina N. V., Zubtcova Yu. A., Kuzhakov P. V., Zak A. et al. Correlations between spectral, time and orientation parameters of liquid crystal cells with WS₂ nanoparticles. *Liquid Crystals and their Applications*. 2020. Vol. 20, No. 3. pp. 41–48. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.3.41.
 16. Kamanina N. V., Zubtcova Yu. A., Toikka A. S., Likhomanova S. V. et al. Temporal characteristics of liquid crystal cell with WS₂ nanoparticles: meso-phase sensitization and relief features. *Liquid Crystals and their Applications*. 2020. Vol. 20, No. 1. pp. 34–40. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.1.34.
 17. Svitkova B., Zavisova V., Nemethova V., Koneracka M. et al. Differences in surface chemistry of iron oxide nanoparticles result in different routes of internalization. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2021. No. 12. pp. 270–281.
 18. Yakasai F., Jaafar M. Z., Bandyopadhyay S., Agi A. et al. Application of iron oxide nanoparticles in oil recovery – a critical review of the properties, formulation, recent advances and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208, Part C. 109438.
 19. Litvinova T. E., Oleynik I. L. Dissolution kinetics of rare earth metal phosphates in carbonate solutions of alkali metals. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 712–722. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.10.
 20. Kondrasheva N. K., Rudko V. A., Nazarenko M. Y., Gabdulkhakov R. R. Influence of parameters of delayed asphalt coking process on yield and quality of liquid and solid-phase products. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. 97. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.97.
 21. Cheremisina O. V., Cheremisina E. A., Ponomareva M. A., Fedorov A. T. Sorption of rare earth coordination compounds. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 474–481. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.10.
 22. Pak V. N., Lapatin N. A., Pronin V. P., Yachmenova L. A. Obtaining and electronic emission of planar structures of metallic copper on a porous ceramic substrate. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 5. pp. 55–58.
 23. Kozlov G. V., Dolbin I. V. The interconnection of efficiency and the degree of aggregation of nanofiller in polymer nanocomposites. *Condensed Matter and Interphases*. 2022. Vol. 24, No. 1. pp. 45–50. DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/9054.
 24. Filippov A. A., Fomin V. M., Karpov E. V. Experimental determination of the elastic characteristics of filled polymers using mechanical tests for constrained compression. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2125, 020014. DOI: 10.1063/1.5117374.
 25. Khozin V. G. Hardening of epoxy polymers. Kazan : Pechatnyi dom, 2004. 446 p.
 26. Vollath D., Fischer F. D., Holec D. Surface energy of nanoparticles – influence of particle size and structure. *Beilstein Journal Nanotechnology*. 2018. Vol. 9. pp. 2265–2276. DOI: 10.3762/bjnano.9.211.
 27. Syzrantsev V. V., Mjakin S. V., Katashev P. A. Comparative study of surface acid-base properties of SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles prepared by different methods. *Glass Physics and Chemistry*. 2022. Vol. 48, No. 6. pp. 636–641. DOI: 10.1134/S1087659622800082.
 28. Syzrantsev V. V. Analysis of variation in the properties of the surface of SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles obtained by different methods. *Condensed Matter and Interphases*. 2022. Vol. 24, No. 3. pp. 369–378. DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/9860.
 29. Rusanova S. N., Sofina S. Y., Temnikova N. E., Starostina I. A. et al. The effect of the phase structure of silane-modified ethylene copolymers on their surface energy and adhesion properties. *Polymer Science, Series D*. 2020. Vol. 13, No. 3. pp. 258–264. DOI: 10.1134/S1995421220030156.
 30. Vertepa A. V., Starostina I. A., Stoyanov O. V., Lygina T. Z. et al. Surface-energy and acid-base properties of clays applied as polymer modifiers. *Polymer Science, Series D*. 2020. Vol. 13, No. 1. pp. 15–20. DOI: 10.1134/S1995421220010256.
 31. Sychov M. M., Zakharova N. V., Mjakin S. V. Effect of milling on the surface functionality of BaTiO₃–CaSnO₃ ceramics. *Ceramics International*. 2016. Vol. 39, No. 6. pp. 6821–6826. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.02.013.
 32. Syrkov A. G., Kushchenko A. N., Silivanov M. O., Taraban V. V. Nanostructured regulation of the surface properties and hydrophobicity of nickel and iron by solid-state reduction and modifying methods. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. pp. 54–59.
 33. Starostina I. A., Kolpakova M. V., Stoyanov O. V. Correlation of approaches to determining the acid-base properties of different surfaces: Problems and prospects. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2020. Vol. 23, No. 6. pp. 13–19.
 34. Syzrantsev V. V., Arymbaeva A. T., Zavjalov A. P., Zobov K. V. The nanofluids' viscosity prediction through particle-media interaction layer. *Materials Physics and Mechanics*. 2022. Vol. 48, No. 3. pp. 386–396. DOI: 10.18149/MPM.4832022_9.
 35. Sychov M. M., Mjakin S. V., Nakanishi Y., Korsakov V. G. et al. Study of active surface centers in electroluminescent ZnS:Cu,Cl phosphors. *Applied Surface Science*. 2005. Vol. 244, No. 1-4. pp. 461–464. DOI: 10.1016/j.apusc.2004.10.103.
 36. Kitichatpayak D., Makcharoen W., Vittayakorn W. Influence of various nanofillers on mechanical and electrical properties of epoxy resin composites. *Polymer Plastics Technology and Materials*. 2022. Vol. 61. pp. 1826–1832.
 37. Hunain B. M., Abbas B. A., Akhudaair J. M. Experimental and numerical studies of fatigue properties of carbon/glass fiber/epoxy hybrid composites enhanced with nano TiO₂ powder. *Diagnostyka*. 2021. Vol. 22, Iss. 2. pp. 75–84.
 38. Syzrantsev V. V., Paukstis E. A., Larina T. V. Surface polymorphism of the silica nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1008, Iss. 1. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1008/1/012030.