

Кочергин Ю.С., д-р техн. наук, проф.,
¹Золотарева В.В., канд. техн. наук, доц.
¹Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского
Григоренко Т.И., канд. техн. наук

ВЛИЯНИЕ НАНОПОРОШКА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

viktoria802@gmail.com

Представлены результаты исследований влияния нанопорошка оксида алюминия на комплекс физико-механических, триботехнических и адгезионных свойств эпоксидных полимеров. Установлено, что введение нанопорошка способствует существенному увеличению прочности при растяжении и сжатии, модуля упругости и деформации при разрыве эпоксидных полимеров.

Ключевые слова: нанопорошок, оксид алюминия, эпоксидный полимер, физико-механические, триботехнические, адгезионные свойства.

Введение. В последнее время одним из интереснейших и перспективных направлений в науке о полимерах и материаловедении является разработка принципов получения полимерных нанокомпозитов [1–7]. Поскольку материалы на основе эпоксидных смол (ЭС) характеризуются высокими физико-механическими, диэлектрическими и химическими свойствами и находят широкое применение в различных отраслях промышленности, они могут служить прекрасной матрицей для получения нанокомпозитов [8–23]. Так согласно [14], введение наноглины в ЭС приводит к повышению теплофизических свойств. При этом 5 %-ная потеря массы наполненного полимера наступает при температуре на 80–100 °С выше, чем у исходной ЭС. С увеличением содержания наполнителя повышается температура активной деструкции композиционного материала. При содержании органоглины 2–3 масс. ч. возрастает прочность при растяжении, а дальнейшее увеличение концентрации наполнителя приводит к её понижению. Модуль упругости повышается вплоть до заполнения 10 масс.ч. [14, 16], а ударная вязкость наполненного органоглиной полимера увеличивается в 2–3 раза и достигает своего максимума при содержании наполнителя 1–2 масс.ч. [18]. Введение в качестве наполнителя SiO₂ и гибридных материалов, содержащих кварц, приводит [10] к повышению теплофизических и физико-механических свойств. При этом снижается термическое расширение композиции, а именно коэффициент термического расширения наполненного полимера на 30–40 % меньше, чем у исходного полимера. Модуль упругости композиционного материала повышается на 20 % по сравнению с исходной ЭС [9, 15]. Введение гибридного Si-содержащего материала приводит к повышению износостойкости и существенному

снижению коэффициента трения с 0,7 до 0,3 [15]. При использовании в качестве наполнителей оксидов и сульфидов металлов установлено [11, 12], что при введении MoS₂ и TiO₂ износ композиции уменьшается в 8–10 раз, а коэффициент трения при этом изменяется незначительно.

Введение нанотрубчатого графита приводит к повышению теплостойкости и температуры начала интенсивной термодеструкции эпоксидного полимера (ЭП) [21].

Авторами [24] показано, что существует сложная зависимость температуры стеклования (T_с) от концентрации многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ). Для базового ЭП значение T_с составляет 65 °С. При малой концентрации МУНТ (0,05 – 0,1 масс.ч.) T_с повышается на 10 – 15 °С, а ширина температурного интервала перехода увеличивается. При увеличении содержания МУНТ выше 0,3 масс. ч. T_с резко снижается, достигая минимума при C = 1 масс.ч. После C > 1,2 масс. ч. T_с снова растет, достигая значения 120 °С при C = 3 масс.ч. По мнению авторов [23] возможными причинами такого поведения являются:

- переотверждение матрицы из-за взаимодействия гидроксильных групп на поверхности нанотрубок с ЭС;
- подвижность НТ, сравнимая с подвижностью полимера;
- разрыхление межфазных слоев, уменьшение плотности упаковки макромолекул;
- большая площадь межфазной поверхности.

Как было установлено в работе [25], снижение температуры стеклования происходит вблизи порога электрической перколяции в эпоксидных нанокомпозитах. Данный эффект авторы

связали с пластифицирующим действием углеродных нанотрубок. Падение T_c в области перколяционного перехода интерпретируется как увеличение подвижности сегментов цепей эпоксидной смолы.

В работе [26] показано, что углеродные нанотрубки (УНТ) в малых количествах (от 0,001 до 0,02 %) значительно повышают прочностные характеристики эпоксидного композиционного материала (прочность при изгибе и модуль упругости возрастают на 27–38 %, прочность при сдвиге на 16 %), что открывает перспективы их применения в авиационной и космической промышленности.

Авторами [27] установлено, что наполнение ЭП углеродными нанотрубками повышает их морозостойкость (вплоть до -196 °С) и работоспособность в условиях термоциклирования.

Предложена [28–31] методика оценки фрактальной размерности поверхности нанокластеров в структуре сетчатых ЭП, трактуемых как естественные наноккомпозиты. Автор [28] исходил из предположений других исследователей [29, 30], которые сформировали положение, что полимерные системы в силу особенностей своего строения всегда являются наноструктурными. При этом существуют различные трактовки такой структуры. Согласно [29], структура полимера представляет собой рыхлоупакованную матрицу, в которую погружены области локального порядка (кластеры). Эти кластеры можно рассматривать как нанонаполнитель, представляющий собой набор нескольких плотноупакованных коллинеарных сегментов разных макромолекул с размерами до 1 нм [29, 30]. Причем в отличие от наночастиц неорганических наполнителей, нанокластеры являются поверхностными фракталами.

Наряду с армирующим действием УНТ способны влиять на изменение физико-механических характеристик композитов за счет участия в процессе отверждения эпоксидных олигомеров и формирования структуры полимерной матрицы [32].

В последнее время большое внимание уделяется исследованию наноккомпозитов и их применению на железнодорожном транспорте [33–36]. Разработаны принципы создания новых антифрикционных многослойных покрытий, в которых основную нагрузку берет на себя металл силового каркаса, а высокие антифрикционные свойства обеспечивает наноструктурное покрытие, которое может состоять из одного или нескольких слоев, несущих различную смысловую нагрузку – одни слои обладают антифрикционной стойкостью, а другие – адгезионной. Данные системы могут быть применены на предприятиях

железнодорожного транспорта как принципиально новый смазочный материал в системе колесо-рельс для нанесения покрытия на боковую грань рельса в кривых малого радиуса. Качественно новые эксплуатационные и потребительские свойства таких изделий позволяют достичь увеличения безаварийного срока службы деталей и устройств, снижения расходов на замену вышедшего из строя оборудования и уменьшения сроков простоя оборудования.

Авторами [37] предложены эпоксидные композиции для ремонта газо-нефтегазопроводов подводных переходов с улучшенными адгезионными характеристиками и прочностью на сжатие. Эффект достигается за счет введения в ЭС наноразмерных частиц фуллерена и органобентонита на основе монтмориллонитовых глин.

В работе [38] дан краткий обзор новейших достижений в области нанотехнологий строительных материалов. Рассматриваются наноструктурные бетоны, в том числе с применением наноккомпозитной арматуры, модифицированные наночастицами сталь, полимерные покрытия и краски, адгезивы, герметики и строительные материалы (в том числе на основе ЭС) специального назначения (полимерные композиты, связующее, стекло), обладающие высокими эксплуатационными свойствами.

Интересным направлением получения наноккомпозитов является золь-гель технология для формирования частиц наполнителя на основе разных алкоксисилановых соединений [39–41]. Установлено, что при содержании полисилоксановых частиц (ПСЧ) 0,5 – 1,5 мас.% для композитов на основе триэпоксида и 1,5 – 3,0 мас.% для композитов на основе диэпоксида наблюдается увеличение прочности при одноосном растяжении модуля упругости, а также адгезионной прочности клеевых соединений при равномерном отрыве. При этом более высокие физико-механические свойства имеют системы, полученные при формировании золь первичных ПСЧ в отсутствие эпоксидного олигомера. Получены композиты с высокими деформационно-прочностными и адгезионными свойствами, термостабильностью, водо-кислото- и щелочестойкостью, которые могут быть использованы в качестве антифрикционных полимерных композитов для стальных и титановых пар трения.

В свете изложенного целью настоящей работы заключалась в исследовании влияния нанопорошка оксида алюминия (Al_2O_3) на физико-механические и адгезионные свойства эпоксидных полимеров.

Методология. В качестве объекта исследования была выбрана промышленная диановая

смола ЭД-20. Отвердителем служил полиокси-пропилен триамин марки Т-403 производства компании Huntsman Chemicals. В качестве нанопорошка использовали оксид алюминия, полученный плазмохимическим методом. Представляет собой γ -фазу с размером частиц 10–300 нм. Отверждение композиций проводили по режимам I (22 °C/24 ч) и II (22 °C/24 ч + 120 °C/3 ч).

Адгезионную прочность клеевых соединений образцов (Ст. 3) при сдвиге (τ_b) и отрыве ($\sigma_{отр}$) определяли по ГОСТ 14759–69 и 14760–69 соответственно. Предел текучести ($\sigma_{сж}^T$) и разрушающее напряжение ($\sigma_{сж}^P$) при сжатии измеряли по ГОСТ 4651-82.

Показатель истирания (I) определяли по ГОСТ 11012–69. Сущность метода заключается в определении уменьшения объема образца в кубических миллиметрах в результате истирания (износа) на 1 м пути истирания шлифовальной шкуркой. Испытания проводили на машине типа APGI (производство ФРГ). Нагрузка на образец составляла 1 кг, длина пути истирания образца – 10 м (25 оборотов цилиндра машины).

Пределные механические свойства при одноосном растяжении измеряли на динамометре Поляни [43]. Модуль упругости (E) рассчитывали по наклону начального участка кривой напряжение – деформация (σ – ϵ). Мерой работы разрушения (A_p) служила площадь под кривой σ – ϵ . Температуру стеклования (T_g) определяли при постоянной растягивающей нагрузке 1 МПа на приборе, описанном в [44]. Объекты исследования деформационно-прочностных свойств представляли собой пленки толщиной ~ 100 мкм, полученные при отверждении композиций между двумя полированными поверхностями металлических плит, покрытым тонким слоем антиадгезива.

Микротвердость измеряли в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

Основная часть. Как следует из рис. 1–3, зависимости деформационно-прочностных свойств от концентрации (C) нанопорошка

имеют экстремальный характер. Максимумы прочности и жесткости (рис. 1) проявляются при содержании наполнителя ~5 масс. ч. При этом значения σ_p в точке максимума превосходят величину прочности базового (не содержащего наполнителя) образца в ~ 1,8 раза.

Что касается модуля упругости, то для образцов, отвержденных по режиму I, при введении Al_2O_3 он увеличивается более, чем в 2 раза, а при отверждении по режиму II примерно в 1,35 раза.

Деформация при разрыве ϵ_p (рис. 2) для образцов, отвержденных по режиму I, после образования слабо выраженного максимума при содержании наполнителя 1–2 масс. ч. наблюдается монотонное снижение ϵ_p . Для образцов, подвергнутых термообработке (режим II), максимум возникает, а уменьшение ϵ_p происходит с разными скоростями: при $0 < C < 5$ масс. ч. и при $C > 15$ масс.ч. снижение очень малое, а в интервале $5 < C < 15$ масс. ч. величина деформации при разрыве убывает достаточно быстро. Такое влияние нанопорошка на деформационную способность может быть, в частности, объяснено следующим образом. Как известно [45], наночастицы проявляют тенденцию к образованию агрегатов с размерами до 300 нм и даже агломератов с размерами до 3000 нм. Согласно [46] структура агрегата с сильно связанными наночастицами при деформации допускает их поворот и скольжение, на что расходуется энергия развивающейся трещины, обуславливая тем самым повышение пластичности материала. Большое значение при этом имеют количество и распределение агрегатов на пути продвигающейся трещины. Трещина быстро продвигается, когда агрегатов мало. Если же агрегатов больше определенного числа, то они начинают работать как множество преград для продвижения трещины, т. е. реализуется определенный упрочняющий эффект. Исходя из этого механизма и учитывая характер наблюдаемых на рис. 2 зависимостей ϵ_p – C, можно предположить, что наночастицы Al_2O_3 связаны в агрегатах намного прочнее в образцах, отвержденных по режиму II.

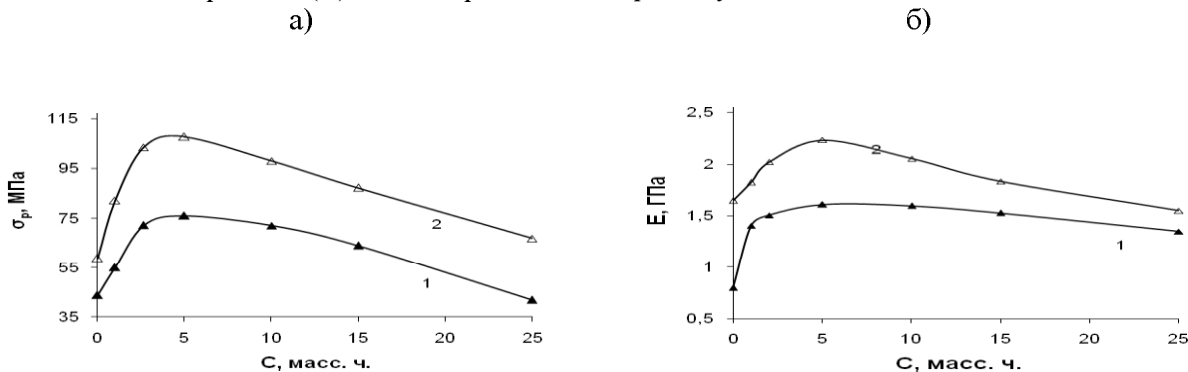


Рис. 1. Зависимость σ_p (а) и E (б) от концентрации Al_2O_3 .

Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

Параметр A_p образует максимум при содержании нанопорошка 3 и 6 масс.ч. соответственно для образцов, отвержденных по режимам I и II (рис. 3).

Как видно из рис. 4, влияние нанопорошка на износ композиций весьма незначительно. Мало сказывается влияние нанопорошка также на прочности ЭП при сжатии (рис. 5) и на адгезионной прочности (рис. 6).

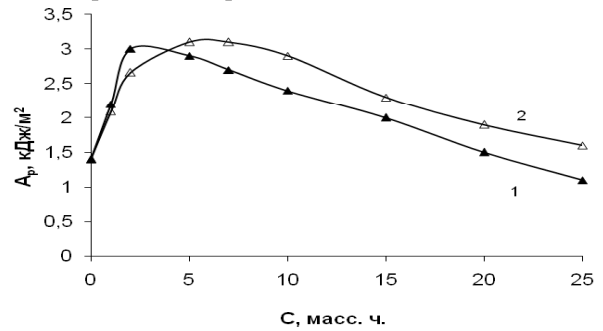
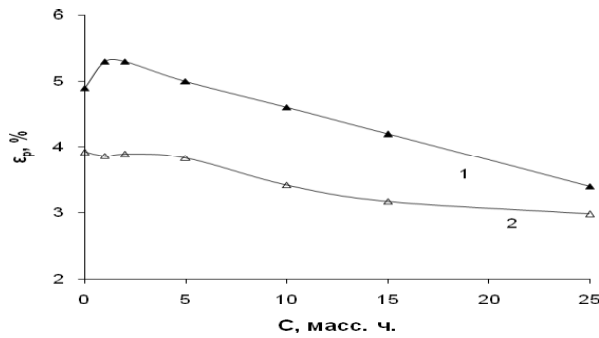


Рис. 2. Зависимость ϵ_p от концентрации Al_2O_3 . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

Рис. 3. Зависимость A_p от концентрации Al_2O_3 . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

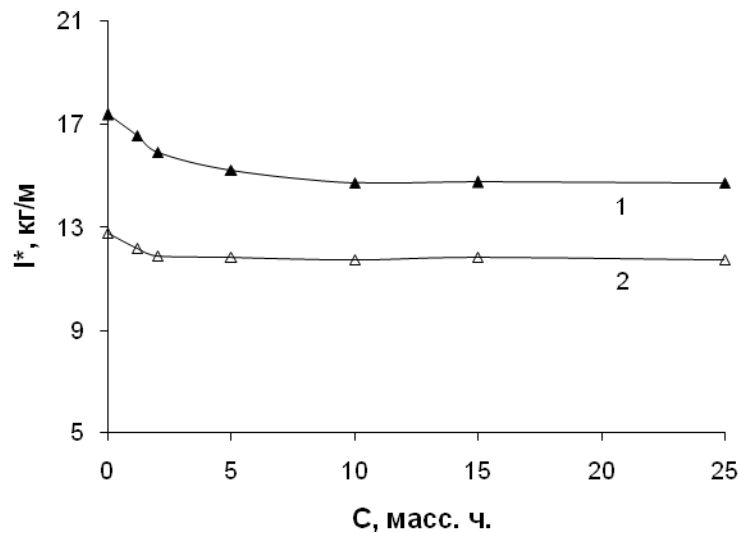


Рис. 4. Зависимость I^* от концентрации Al_2O_3 . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2). $I^* = I \cdot \rho$, где ρ – плотность ЭП

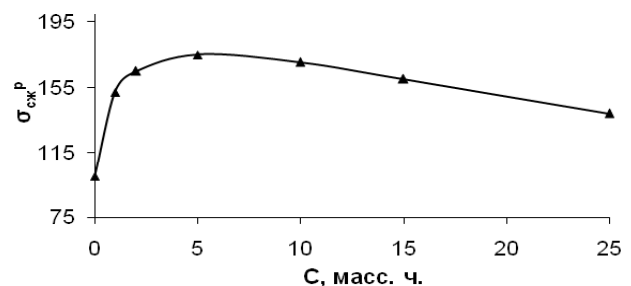
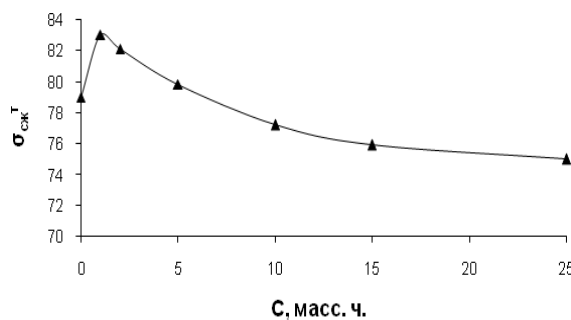


Рис. 5. Зависимость $\sigma_{сжТ}$ и $\sigma_{сжР}$ от концентрации Al_2O_3 . Образцы отверждены по режиму II

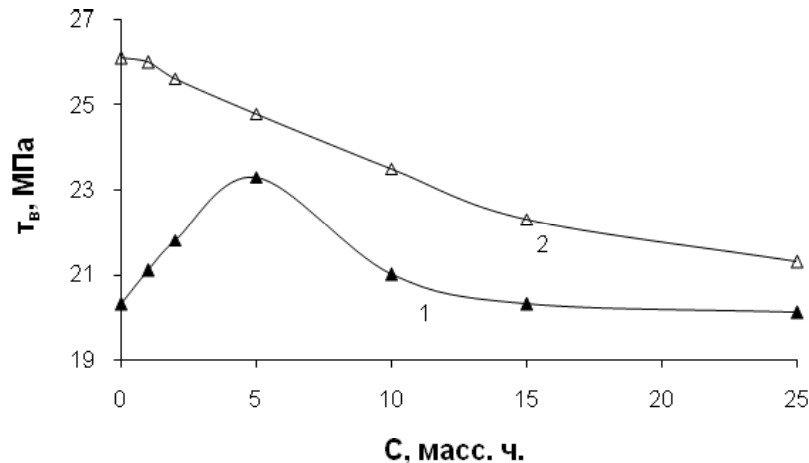


Рис. 6. Зависимость τ_b от концентрации Al_2O_3 . Образцы отверждены по режимам: I (1) и II (2)

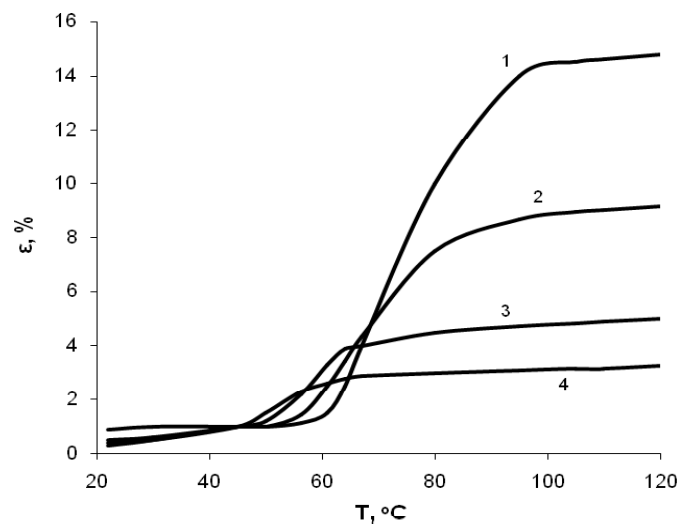


Рис. 7. Термомеханические кривые базового эпоксидного полимера (1) и наполненного 2 (2), 5 (3) и 15 (4) масс. ч. Al_2O_3 . Образцы отверждены по режиму I

Рассмотрим далее зависимость теплофизических свойств от количества нанопорошка. Как следует из рис. 7, с увеличением концентрации Al_2O_3 наблюдается уменьшение температуры стеклования (на $\sim 10^\circ C$ при $C = 15$ масс.ч) и снижение деформации в высокоэластичном состоянии (почти в 5 раз). Последнее обстоятельство свидетельствует о значительном увеличении эффективной прочности пространственной сетки, образованной химическими и физическими связями. Авторы [47, 48], наблюдавшие подобное снижение T_c при исследовании ЭП, наполненных нанопорошком SiC (на $8^\circ C$ при массовой доле 20 %), предложили следующее объяснение этого явления.

В присутствии поверхностей раздела полимерная матрица – наночастица изменяется кинетика процесса расстеклования (т. е. перехода из

стеклообразного в высокоэластическое состояние). Увеличивается его скорость или число и/или число фронтов превращений общей трансформации в композиции, содержащей нанонаполнитель.

Может быть предложено еще одно объяснение эффекта уменьшения температуры стеклования при введении нанопорошка. Известно [49], что для композиционных материалов на основе ЭП может наблюдаться эффект пластификации, обусловленный избирательной адсорбцией компонентов неотвержденной системы наполнителем. В результате вблизи наполнителя возможно образование в структуре композита участков с недостатком (если адсорбируется преимущественно отвердитель) или избытком (если адсорбируется смола) отвердителя. Эти участки будут обладать меньшей величиной T_c и тем самым

оказывать пластифицирующее действие на всю полимерную матрицу.

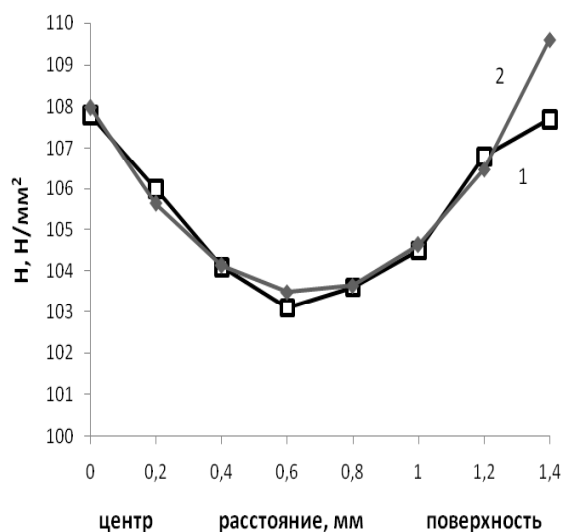


Рис. 8. Зависимость Н от расстояния слоев образца до центра поперечного сечения нанокompозитов, содержащих 5 масс.ч. Al_2O_3 .

1 – экспериментальная кривая; 2 – аналитическая зависимость

Как видно из рис. 8 показатель микротвердости Н зависит от геометрических размеров образца. В поперечном сечении образца величина Н с удалением от центра вначале несколько уменьшается, достигая минимума при расстоянии около 0,6 мм, а затем по мере удаления от центра и приближения к поверхности образца микротвердость возрастает.

Экспериментальная кривая, представленная на рис. 8, достаточно хорошо описывается аналитической зависимостью

$$H = 107,9762 - 13,75 \cdot x + 10,4167 \cdot x^2 \text{ (кривая 2),}$$

где x – расстояние слоя образца до его центра.

Выводы. Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о весьма сложном характере влияния нанопорошка Al_2O_3 на комплекс механических, триботехнических и теплофизических свойств эпоксидных полимеров. Установлено, что наполнение нанопорошками способствует существенному увеличению прочности при растяжении (в 1,8–2,0 раза), сжатии (в 1,2–1,5 раза), модуля упругости (в 1,4–1,7 раза) и деформации при разрыве (на 30 %) эпоксидных полимеров при незначительном изменении адгезионной прочности и стойкости к износу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ozerin A.N., Svergun D.I., Volkov V.V. [et al] The spatial structure of dendritic macromolecules // *J. Appl. Cryst.* 2005. Vol. 38. Pp. 996–1003.

2. Ivanchev S.S., Ozerin A.N. Nanostructures in polymer systems // *Polym. Sci. Ser. B.* 2006. Vol. 48. № 7–8. Pp. 213–225.

3. Kurkin T.S., Ozerin A.N., Keчекjan A.S. [et al] The Structure and Properties of Polymer Composite Fibers Based on Poly (vinyl alcohol) and Nanodiamond of Detonation Synthesis // *Nanotechnologies in Russia.* 2010. Vol. 5. № 5–6. Pp. 340–351

4. Чвалун С.Н. Полимерные нанокompозиты // *Конструкторское бюро.* 2011. № 3. С. 57–68.

5. Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Перспективные разработки ВИАМ в области наноматериалов и нанотехнологий // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2012. № 6. С. 9–15.

6. Paul D.K., Robeson L.M. Polymer nanotechnology: Nanocomposites // *Polymer.* 2008. Vol. 49. Pp. 3187–3204.

7. Krishnamoorti R., Vaia R.A. Polymer nanocomposites // *J. Polymer Sci: Part B: Polymer Phys.* 2007. Vol. 45. № 24. Pp. 3252 – 3256.

8. Кузьяев И.М., Сытар В.И., Кабат О.С. Основные направления развития науки и техники в области полимерных нанокompозитов и нанотехнологий на современном этапе // *Вопросы химии и химической технологии.* 2006. № 4. С. 126–130.

9. Bondioli F., Cannillo V., Fabbri E., Messori M. Epoxy-Silica Nanocomposites: Preparation, Experimental Characterization, and Modeling // *Journal of Applied Polymer Science.* 2005. Vol. 97. № 6. Pp. 2382–2386.

10. Ochi M., Matsumura T. Thermomechanical Properties and Structure of Epoxy / Silica Nano-Hybrid Materials Constructed from a Linear Silicone Oligomer, // *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer physica.* 2005. Vol. 43. № 13. Pp. 1631–1639.

11. Schon J. Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite // *Wear.* 2004. Vol. 257. Pp. 395–407.

12. Chang L., Zhang Z., Breidt C., Friedrich K. Tribological. properties of nanocomposites. I. Enhancement of the wear resistance by nano- TiO_2 particles // *Wear.* 2005. Vol. 258. Pp. 141–148.

13. Xiubing Li, Gao Yimin, Xing J. [et al] Wear reduction mechanism of graphite and MoS_2 in epoxy composites // *Wear.* 2004. Vol. 57. P. 279–283.

14. Kotsilkova R. Processing-Structure-Properties Relationships of Mechanically and Thermally Enhanced Smectite Epoxy Nanocomposites // *Journal of Applied Polymer Science.* 2005. Vol. 97. № 6. Pp. 2499–2510.

15. Shi G., Zhand M.G., Ronga M.Z. [et al] Friction and wear of low nanometer Si_3N_4 filled epoxy composites // *Wear.* 2003. Vol. 254. Pp. 784–796.

16. Liu T., Tjiu W.C., Tong Y. [et al] Morphology and Fracture Behavior of Intercalated Epoxy /

Clay Nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2004. Vol. 94. № 3. Pp. 1236–1244.

17. Brown G.M., Ellyin F. Assessing the Predictive Capability of Two-Phase Models for the Mechanical Behavior of Alumina Epoxy Nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2005. Vol. 98. № 2. Pp. 869–879.

18. Basara C., Yilmazer U., Bayram G. Synthesis and Characterization of Epoxy Based Nanocomposites // Journal of Polymer Science: Part B: Polymer physics. 2005. Vol. 98. № 3. Pp. 1081–1086.

19. Fidelusa J. D., Wiesela E., Gojny F.H., и др. Thermo-mechanical properties of randomly orientec: carbon / Epoxy Nanocomposites // Composites: Part A. –2005. Vol. 36. Pp. 1555–1561.

20. Chisholm N., Mahfus H., Rangari V.R., [et al] Fabrication and mechanical characterization of carbon / SiC-epoxy nanocomposites // Composites Structures. 2005. Vol. 67. № 2-4. Pp. 115–124.

21. Thielemans W., McAninch I.V., Barron V. [et al] Impure Carbon Nanotubes as Reinforcements fo Acrylated Epoxidized Soy Oil Compositrs // Journal of Applied Polymer Science. 2005. Vol. 98. № 3. Pp. 1325–1338.

22. Ratna D., Manoj N., Varley R. [et al] Clay-reinforced epoxy nanocomposites // Polym. Ind. 2003. Vol. 52. Pp. 1403–1407.

23. Korumanna X., Lindberg H., Berglunda L.A. Synthesis of epoxy nanocomposites: influence of the nature of the clay on structure // Polymer. 2001. Vol. 42. Pp. 1303–1310.

24. Драгун В.Л., Евсеева Л.Е. Межфазное взаимодействие в эпоксидных нанокompозитах и его влияние на температуру стеклования // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Двадцать девятой Международной конференции и семинара. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2009. С. 119–121.

25. Barrau S., Demont P., Perez E. [et al] Glass Transition Temperature Depression at the Percolation Threshold in Carbon Nano-tube-Epoxy Resin and Polyppyrrole-Epoxy Resin Composites // Macromolecules. 2003. Vol. 36. № 12. Pp. 9678–9685.

26. Кайсина Т.И., Шебанов С.М., Никитин В.В. [и др.] Прочностные характеристики нанокompозиционных материалов // Композиционные материалы в промышленности: Материалы Двадцать восьмой Международной конференции. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2008. С. 442–444.

27. Драгун В.Л., Евсеева Л.Е. Теплопроводность эпоксидных нанокompозитов под воздействием знакопеременных тепловых нагрузок // Композиционные материалы в промышленности: Композиционные материалы в промышленности: Материалы Тридцатой Юбилейной Международной конференции, 7–11 июня 2010 г. Ялта.

Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2010. С. 323–326.

28. Магомедов Г.М., Амиршахова З.М., Козлов Г.В. Оценка фрактальной размерности поверхности нанокластеров в эпоксиполимерах // Композиционные материалы в промышленности: Материалы Тридцатой юбилейной Международной конференции, 7–11 июня 2010 г. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2010. С. 308–312.

29. Иванчев С.С., Озерин А.Н. Наноструктуры в полимерных системах // Высокомолекулярные соединения. Сер.Б. 2006. Т. 48. № 8. С. 1531–1544.

30. Mikitaev A.K., Kozlov G.V., Zaikov G.E. Polymer Nanocomposites: Variety of Structural Forms Applications. New York: Nova Science Publishers Inc., 2008. 319 p.

31. Козлов Г.В., Новиков В.У. Кластерная модель аморфного состояния полимеров // Успехи физических наук. 2001. Т 171. № 7. С. 717–764.

32. Богатов А.В., Кондрашов С.В., Мансурова И.А. [и др.] О механизме усиления эпоксидных смол углеродными нанотрубками // Все материалы энциклопедический справочник. 2012. № 4. С. 7–11.

33. Kolesnikov V.I., Myasnikova N., Saverkova M. [et al] Polymeric composites and lubricants for the wearresistant friction units of railway mechanics // Transport problems. 2009. Vol. 4. Issue 3. Part 1. Pp. 65–70.

34. Колесников В.И. Повышение износостойкости металлополимерной трибосистемы с использованием нанотехнологий // Транспорт России: становление, развитие, перспективы: Материалы научно-практической конференции, 18 ноября 2009 г. М.: МИИЕ. 2009. № 5. С. VII-5-VII-11.

35. Колесников В.И., Сычев А.П., Бардушкин В.В. [и др.] Эффективные упругие характеристики антифрикционных композитов на эпоксидной основе // Вестник Южного научного центра. 2010. №1. С. 5–10.

36. Колесников В.И. Повышение износостойкости металлополимерных систем с использованием нанотехнологий // Современные проблемы механики сплошной среды: тезисы докл. XIV международной конференции 19–2 июня 2010 г. Ростов-на-Дону. 2010. С. 49–50.

37. Натрусов В.И., Шацкая Т.Е., Беляева Е.А. [и др.] Модификация эпоксидных матриц холодного отверждения наноматериалами углеродного и силикатного типов // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Двадцать

восьмой Международной конференции и выставки, 26-30 мая 2008г. Ялта. Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». 2008. С. 3–5.

38. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. 2012. №3. С. 6–21.

39. Жильцова С.В., Михальчук В.М., Белошенко В.А., Кирилаш А.В. Влияние молярного соотношения тетраэпоксисилана и глицидоксипропилтриэпоксисилана на свойства эпоксидно-силоксановых композитов ангидридного отверждения // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. № 4. С. 676 – 682.

40. Жильцова С.В., Бабкина Н.В., Михальчук В.М. Динамические механические и адгезионные свойства эпоксидно-силоксановых нанокompозитов, полученных золь-гель методом // Полимерный журнал. 2010. Т. 33. № 1. С. 11–16.

41. Жильцова С.В., Михальчук В.М., Бабкина Н.В. [и др.] Вязкоупругие и деформационно-прочностные свойства эпоксидно-силоксановых композитов на основе эпоксидной смолы EPONEX 1510 // Клеи. Герметики. Технологии. 2011. № 5. С. 12–18.

42. Наполнители для полимерных материалов: Справочное пособие: Пер. с англ./ Под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1981. 736 с.

43. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1983. 248 с.

44. Кочергин Ю.С., Аскадский А.А., Салазкин С.Н. и др. Исследование ползучести линейных и сетчатых полимеров на основе полиарилатов и эпоксидных полимеров // Высокомолек. соед. А, 1978. Т.20. № 4. С.880–887.

45. Белошенко В.А., Варюхин В.Н. Эффект памяти формы в полимерах и его применение. Киев: Наук. думка, 2005. 192 с.

46. Yiang X.-L., Jorolan E., Shaw L., Gell M. Deformation of nanostructured ceramic coatings// Materials Science. 2003. Vol. 39. № 2. Pp. 305–306.

47. Basara C., Yilmazer U., Bayram C. Synthesis and Characterization of Epoxy Based Nanocomposites // J. Polym. Sci: Part B: Polymer Physics. 2005. Vol. 98. № 3. Pp. 1081–1086.

48. Gall R., Dunn M.L., Liu Y. Internal stress storage in shape memory polymers nanocomposites // Appl. Phys. Lett. 2004. V.85. № 2. Pp. 290–292.

49. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. Казань: ПИК «Дом печати». 2004. 446 с.

Kochergin Yu.S., Zolotareva V.V., Grigorenko T.I.
INFLUENCE OF THE NANO-POWDER OF ALUMINUM OXIDE ON THE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Presents research results of the influence of nanopowder aluminum oxide on complex mechanical, tribological and thermal properties of epoxy polymers. It is established that the introduction of nanopowder contributes to a significant increase in tensile strength and compressive strength, elastic modulus and strain at break of epoxy polymers.

Keywords: nanopowder, aluminum oxide, epoxy polymer, physico-mechanical, tribological, adhesive properties.

Кочергин Юрий Сергеевич, доктор технических наук профессор,
Адрес: 86114, г. Макеевка, Донецкой обл., д. 80, кв. 189
E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua

Золотарева Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского
Адрес: 83117, г. Донецк, ул. Щорса, 31
E-mail: viktoria802@gmail.com

Григоренко Татьяна Ильинична, кандидат технических наук.
Адрес: 83059, г. Донецк, пр. Ильича, 97
E-mail: grigorencot2013@mail.ru