

Влияние графеновых 2D-наноструктур на прочностные характеристики композиционного материала

УДК 678.643.42.5:667.6:620.18



В. В. Носов,
профессор кафедры метрологии,
приборостроения и управления качеством¹,
докт. техн. наук,
эл. почта: nosov_vv@pers.spmi.ru; nosovvv@list.ru



А. П. Возняковский,
заведующий сектором наногетерогенных
полимерных материалов², докт. хим. наук,
эл. почта: voznap@mail.ru



И. А. Королёв,
доцент кафедры машиностроения¹,
канд. техн. наук,
эл. почта: korolev_ia@pers.spmi.ru



Д. А. Кульбеда,
магистрант кафедры метрологии,
приборостроения и управления качеством¹,
эл. почта: kuda9909@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² ФГУП НИИ Синтетического каучука имени академика С. В. Лебедева, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Благодаря высоким эксплуатационным характеристикам и долговечности углеродные композиционные материалы широко используют в качестве защитных покрытий на цветных металлах в разных отраслях промышленности [1–4]. В частности, при получении материалов на основе эпоксидных форполимеров с улучшенным комплексом свойств все чаще используют 2D-графеновые структуры [5–15]. Основные ожидания, связанные с введением в объем полимерной матрицы высокодисперсных веществ, — улучшение их прочностных параметров. Стандартные данные, получаемые по традиционным для полимерного и композиционного материаловедения методикам прочностного исследования (одноосное деформирование), малоинформативны [16–29]. Способ, основанный на информационно-кинетическом подходе к диагностированию и многоуровневой модели потока импульсов

Приведены результаты исследований свойств нового композиционного материала, основанного на эпоксидной смоле с добавлением 3 % порошка графена, полученного экономичным и производительным методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) из целлюлозы. Целью исследования являлось выявление влияния полученного новым методом графена на прочность композиционного материала посредством сравнения разных показателей прочности его образцов. Для этого сравнивали результаты механических испытаний и зарегистрированных сигналов акустической эмиссии (АЭ) до и после включения частиц активированного графена в состав материала. Представлены многоуровневая модель потока импульсов АЭ, технологии получения образцов и методика их испытаний. Показаны связанное с совершенствованием физической наноструктуры материала упрочняющее воздействие графена, перспектива разработки методов неразрушающего контроля и диагностирования прочностного состояния изделий.

Ключевые слова: композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, графен, акустическая эмиссия, многоуровневая модель, энергия активации, микротрещины.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.02

акустической эмиссии [30, 31] может оказаться лучше. Результаты таких исследований необходимы для понимания механизмов разрушения и упрочнения полимерных материалов, оптимизации возможностей их практического применения.

Подготовка образцов для исследований

Для проведения экспериментов были получены образцы эпоксидного полимера ЭД-20, наполненные малослойным графеном (МГ). Для этого исходную смолу ЭД-20 подвергли вакуумированию в сушильном шкафу Being BV-20 при 60 °С в течение 2 ч в целях удаления растворенного воздуха. Затем в объем полимерной матрицы при перемешивании вводили навеску наполнителя. Для получения однородного распределения части МГ на полученную систему дополнительно воздействовали ультразвуком в ванне ПСБ-9528-05 28 кГц в течение 15 мин. После этого к смеси добавляли отвердитель тетраэтилентетрамин в соотношении 15:100 и осторожно перемешивали вручную в ступке в течение 5 мин. Для удаления захваченного при перемешивании воздуха полученный композит вакуумировали при 100 Па в течение 10 мин. Для завершения реакции отверждения все образцы были выдержаны 4 ч при комнатной температуре, с последующим доотверждением последовательно в течение 2 ч при 80 °С и 1 ч при

110 °С. Габаритные размеры полученных композиционных материалов (КМ) составляли примерно 150×30×5 мм; перед испытаниями их уточняли.

Малослойный графен (наполнитель) получали карбонизацией кристаллической микроцеллюлозы в условиях процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Исходный биополимер (целлюлоза) смешивали с нитратом аммония в гравитационном смесителе типа «пьяная бочка» в течение 30 мин при соотношении по массе 4:6. Полученную смесь помещали в реактор, где нагревали до температуры 300 °С, под воздействием которой спонтанно запускался процесс СВС. Полученный непосредственно после синтеза порошок малослойного графена дополнительно подвергали механоактивации обработкой в планетарной мельнице Fritsch Laboratory Instruments 000 (15 мин).

Образцы полученных КМ устанавливали в нагружающее устройство. На композит устанавливали датчики акустической эмиссии (АЭ), предварительно смазанные консистентной смазкой для акустического контакта. До начала эксперимента проверяли чувствительность этих приборов с помощью имитатора Су-Нильсена (излом стержня цангового карандаша). После этого образцы нагружали на растяжение при комнатной температуре на универсальной разрывной машине Zwick/Roell Z100 с постоянной скоростью деформирования. Для регистрации сигналов АЭ использовали автоматизированную акустико-эмиссионную диагностическую систему СДАЕ 16(2) [30, 31]. Результаты регистрации обрабатывали по многоуровневой модели потока импульсов АЭ.

Описание многоуровневой математической модели потока импульсов акустической эмиссии

Вид многоуровневой модели описывается уравнением

$$\xi(t) = k_{AE}C(t), \tag{1}$$

где $\xi(t)$ — первичный информативный параметр АЭ; k_{AE} — акустико-эмиссионный коэффициент; $C(t)$ — уравнение, описывающее рост концентрации микротрещин в материале в условиях структурной и прочностной неоднородностей.

Согласно подходу, в основе которого лежит кинетическая концепция прочности как физическое обоснование разрушения твердых тел [32–36], материал состоит из структурных элементов, прочность которых определяет прочность всего объекта. При этом время до разрушения структурного элемента описывается формулой Журкова

$$\theta = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{KT} \right], \tag{2}$$

где $\tau_0 = 10^{-13}$ с — период атомных колебаний; U_0 — энергия активации (сублимации); γ — структурно-чувстви-

тельный параметр; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; σ — действующее на структурном элементе напряжение.

Из-за прочностной и структурной неоднородности материала среднестатистическое время ожидания разрушения структурного элемента будет непостоянным. С учетом этого в модель вводим функцию $\Psi(\omega)$ плотности распределения параметра прочностного состояния структурного элемента $\omega = \gamma\sigma/KT$ (рис. 1).

Если разрушаются структурные элементы из «хвоста» распределения $\Psi(\omega)$ с большими значениями $\omega = \text{var}$, то это неоднородное разрушение, а если структурные элементы из «колокола» распределения, где $\omega = \text{const}$ — однородное. При неоднородном разрушении поражаются структурные элементы, не отвечающие за прочность; этап однородного разрушения завершает процесс. При однородном разрушении ломаются самые прочные структурные элементы с одинаковыми прочностными свойствами, определяющими прочность образца. Значения γ можно получить непосредственно из эксперимента при обработке результатов регистрации АЭ на этапе однородного разрушения. При этом число импульсов АЭ на этапе однородного разрушения при постоянной скорости нагрузки $\dot{\sigma}$ задается выражением

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE}C_0KT \cdot \exp \left[\frac{\gamma \dot{\sigma} t - U_0}{KT} \right] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}), \tag{3}$$

где N_{Σ} — число импульсов акустической эмиссии; k_{AE} — акустико-эмиссионный коэффициент; C_0 — начальная концентрация структурных элементов. При корректных АЭ-испытаниях ($k_{AE} \approx \text{const}$) и после математических преобразований уравнения (3) можно получить диагностические концентрационно-кинетические показатели АЭ, которые в случае стабильности значения энергии активации можно использовать для оценки прочностного состояния материала неразрушающим путем:

$$X_{AE} = \frac{d \ln N_{\Sigma}(t)}{dt} = \frac{\gamma \dot{\sigma}}{KT}, \tag{4}$$

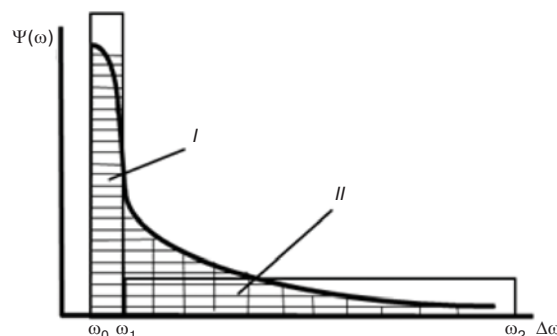


Рис. 1. Моделирующий прочностную неоднородность график плотности распределения параметра прочностного состояния ω по структурным элементам: I — «колокол» распределения; II — «хвост» распределения

$$Y_{AE} = \frac{d \ln N_{\Sigma}(t)}{d\sigma} = \frac{\gamma}{KT}. \quad (5)$$

Каждый из параметров, входящих в уравнение (6), имеет определенный физический смысл и зависит от разных факторов, что позволяет раскрыть механизмы влияния этих факторов на свойства материала. Акустико-эмиссионный коэффициент k_{AE} представляет собой акустически активный объем материала, который может быть стабилизирован для каждого канала регистрации при корректных АЭ-испытаниях. Параметр γ характеризует молекулярную структуру материала и малочувствителен к его химической природе. Энергия активации процесса разрушения U_0 не зависит от состояния структуры материала и определяется характеристиками химического взаимодействия

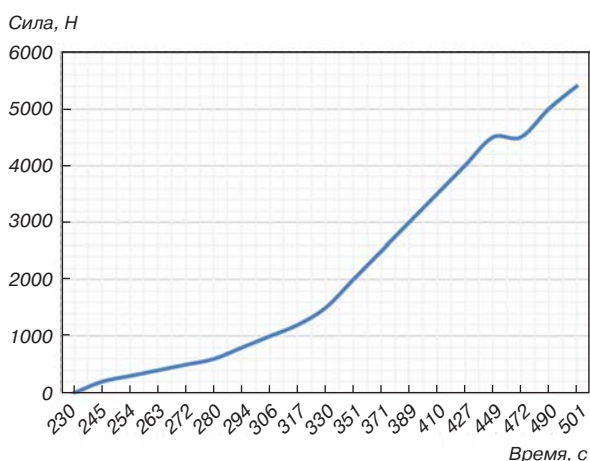


Рис. 2. Кривая деформации от времени для одного из образцов

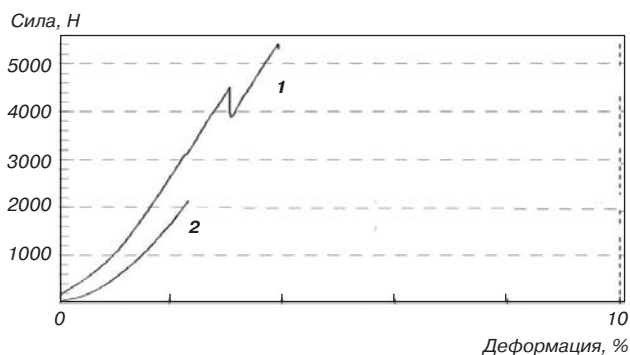


Рис. 3. Графики зависимостей усилий нагружения и относительных удлинений, полученные при испытаниях образцов КМ с 3 % МГ (1) и без наполнителя (2)

Результаты испытаний одной серии образцов КМ из эпоксидной смолы с добавлением частиц графена и без него

Номер образца	E_y , МПа	σ_B , МПа	ϵ_B , %	h , мм	b , мм	A_0 , мм ²
1 (с 3 % графена)	355	25,3	3,9	6,48	33	213,84
2 (без графена)	123	11,2	2,3	5,77	32,9	189,83

Обозначения: E_y — модуль упругости; $\sigma_B = \sigma^*$ — предел прочности; ϵ_B — относительное удлинение; h — толщина; b — ширина; A_0 — площадь поперечного сечения образца.

связей. Ее рассчитывают, используя результаты разрушающих испытаний и зарегистрированных сигналов АЭ по формуле

$$U_0 = KT[\sigma^* Y_{AE} + \ln [C_0/(\tau_0 Y_{AE} \dot{\sigma} C^*)]], \quad (6)$$

где σ^* — разрушающее напряжение; $\dot{\sigma}$ — скорость роста напряжений в процессе испытаний; C^* — критическая концентрация микротрещин. Было принято допущение: $C_0/C^* \approx 100$.

Экспериментальные результаты

В процессе испытаний на растяжение к образцу прикладывали нагрузку, возрастающую со временем до тех пор, пока он не разрушался. Значения нагрузки и смещения непрерывно регистрировали, как показано на рис. 2 и 3 для каждого изделия и использовали для расчета кривой напряжения — деформации КМ. Максимальную нагрузку и предел прочности при растяжении образцов определяли по этой кривой. Важно отметить, что во время испытания на растяжение композиты находились в контролируемой среде, где температура и влажность поддерживались постоянными для обеспечения точных результатов. Результаты эксперимента для одной серии образцов показаны в таблице и на рис. 3.

Критерием упрочняющего влияния графена являлось отношение пределов прочности σ_{B1} образца эпоксидной смолы с 3 % МГ и σ_{B2} образца композита без наполнителя. Для этой серии образцов было получено значение:

$$\frac{\sigma_{B1}}{\sigma_{B2}} = \frac{25,3 \text{ МПа}}{11,2 \text{ МПа}} = 2,26.$$

Таким образом, добавление 3 % МГ в матричную основу из эпоксидной смолы увеличивает предел прочности КМ более чем в 2 раза.

Определение параметров модели и анализ результатов исследований

Для определения параметров модели на графике зависимости числа импульсов от времени (рис. 4) в интервале с 330 до 502 с выделяли участки однородного разрушения, для которых рассчитывали диагностический показатель Y_{AE} по формуле (5). В частности, для интервала 330...450 с равномерного нагружения, обеспечивающего корректность АЭ-испытаний, находили значения числа импульсов и нагрузки, полученные из рис. 2.

$$Y_{AE} = \frac{d \ln N_{\Sigma}(t)}{d(\sigma)} = \frac{\ln(20) - \ln(5)}{4500/0,00021384 - 1500/0,00021384} = 9,89 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1},$$

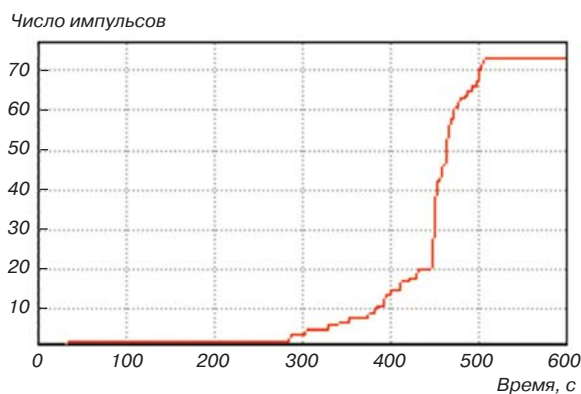


Рис. 4. Зависимость числа импульсов АЭ от времени для одного из образцов

где $\sigma = P/A$; P — нагрузка на образец, Н; $A = 0,00021384 \text{ м}^2$ — площадь поперечного сечения образца.

Временной интервал предшествовал моменту окончательного разрушения образца, что свидетельствовало о неразрушающем характере оценки параметра Y_{AE} .

По формуле (6) рассчитывали энергию активации. Для этого находили значение скорости роста напряжений $\dot{\sigma}$ для исследуемого образца:

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma_{B1}}{t_2 - t_1} = 0,0934 \text{ МПа/с},$$

где $t_2 - t_1 = 501 - 230 = 271 \text{ с}$ — общее время нагружения образца. Рассчитанная энергия активации процесса разрушения составила $U_0 = 105 \text{ кДж/моль}$. Такое значение с разбросом в 1 % было получено и на других образцах с разным процентным содержанием

МГ, в том числе и без него, что показало отсутствие химических превращений материала при вводе графена. Упрочняющее воздействие МГ связано с совершенствованием физической наноструктуры материала, отслеживаемым структурно-чувствительным параметром Y_{AE} . Стабильность величины U_0 в совокупности с неразрушающим характером определения параметра Y_{AE} означает возможность прогнозирования разрушающих напряжений на основании данных неразрушающего АЭ-контроля и расчета σ^* из формулы (6).

Заключение

Результаты исследований показали упрочняющее воздействие на КМ частиц графена, введенных в качестве наполнителя. Определение параметров многоуровневой модели потока импульсов АЭ позволило связать это упрочнение с совершенствованием физической наноструктуры материала. Возможность определения значений индивидуального структурно-чувствительного концентрационно-кинетического АЭ-показателя прочности по предшествующему разрушению временному интервалу и стабильность значений остальных параметров модели показало применимость подхода для неразрушающего АЭ-контроля прочности образцов нового КМ. Предложенное решение способно стать базой эффективного диагностирования состояния изделий, изготавливаемых из рассматриваемого в статье материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. pp. 14–18
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.02

INFLUENCE OF 2D GRAPHENE NANOSTRUCTURES ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE MATERIAL

Information about authors

V. V. Nosov, Professor of the Department of Metrology, Instrumentation and Quality Management¹, Doctor of Technical Sciences, e-mail: nosovvv@list.ru
A. P. Voznyakovskiy, Head of the Sector of Nanoheterogeneous Polymer Materials², Doctor of Chemical Sciences, e-mail: voznap@mail.ru
I. A. Korolev, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: korolev_ia@pers.spmi.ru
D. A. Kulbeda, Master's Student at the Department of Metrology, Instrumentation and Quality Management¹, e-mail: kuda9909@yandex.ru

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

² S.V. Lebedev Scientific Research Institute of Synthetic Rubber, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper describes the results of a study that looked at a new epoxy resin composite containing 3% of graphene powder produced from cellulose by the cost-effective and high-performance method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The aim of this research was to understand the effect of graphene obtained with the help of the above novel technique on the strength of the composite by comparing different strength indicators of

its specimens. For this, the authors compared the results of mechanical tests, as well as the registered acoustic emission signals, before and after activated graphene particles were included in the material.

The paper also describes a multilevel model of acoustic emission pulse flow, the sample preparation process and the test procedure applied. The authors demonstrate the strengthening effect of graphene related to the optimized physical nanostructure of the material, as well as the prospects of developing non-destructive testing techniques and techniques to test the strength status of final products.

Key words: composite, self-propagating high-temperature synthesis, graphene, acoustic emission, multilevel model, activation energy, microcracks.

References

- Ageeva K. A. Analysis of the possibility of using coatings based on graphene for processing metal structures to reduce risks man-made accidents. *Civil Security Technology*. 2022. Vol. 19, No. 2. pp. 92–95.
- Kozlov G. V., Dolbin I. V. Comparative analysis of the effectiveness of carbon nanotubes and graphene in the reinforcement of polymer nanocomposites. *Solid State Physics*. 2020. Vol. 62, No. 8. pp. 1240–1243.
- Feshchenko R. Yu., Eremin R. N., Erokhina O. O., Povarov V. G. Improvement of oxidation resistance of graphite blocks for the electrolytic production of magnesium by impregnation with phosphate solutions. Part 2. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 1. P. 24–29.
- Kozyrev B. A., Sizyakov V. M., Arsentyev V. A. Principles of rational processing of red mud with the use of carboxylic acids. *Non-ferrous Metals*. 2022. No. 2. P. 30–34.
- Sldozyan R. D., Mikhaleva Z. A., Tkachev A. G. Physical and mechanical properties of building composites with carbon nanostructures. *Materials*

- Science. Power Engineering*. 2020. Vol. 26, No. 2. pp. 100–110. DOI: 10.18721/JEST.26208.
6. Zaitsev I. A., Blokhin A. N. Strengthening of epoxy resins with carbon nanomaterials. *Materials Science. Power Engineering*. 2021. Vol. 27, No. 1. S. pp. 74–86. DOI: 10.18721/JEST.27106.
7. Bouhamed A., Al-Hamry A., Müller C., Choura S. et al. Assessing the electrical behaviour of MWCNTs/epoxy nanocomposite for strain sensing. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 128. pp. 91–99. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.005.
8. Yunusov F. A., Larionova T. V., Tolochko O. V. Influence of alloying elements on the structure and properties of composite materials based on aluminum with carbon nanoparticles. *Global Energy*. 2022. Vol. 28, No. 3. pp. 75–84.
9. Chatterjee S., Wang J. W., Kuo W. S., Tai N. H. et al. Mechanical reinforcement and thermal conductivity in expanded graphene nanoplatelets reinforced epoxy composites. *Chemical Physics Letters*. 2012. Vol. 531. pp. 6–10. DOI: 10.1016/j.cplett.2012.02.006.
10. Stankovich S., Dikin D. A., Dommett G. H. B., Kohlhaas K. M. et al. Graphene-based composite materials. *Nature*. 2006. Vol. 442. pp. 282–286. DOI: 10.1038/nature04969.
11. Sun Xuemei, Sun Hao, Houpu Li, Peng Heisheng. Developing polymer composite materials: Carbon nanotubes or graphene? *Advanced Materials*. 2013. Vol. 25, Iss. 37. pp. 5153–5176. DOI: 10.1002/adma.201301926.
12. Bai Hua, Li Chun, Shi Ge. Functional composite materials based on chemically converted graphene. *Advanced Materials*. 2011. Vol. 23, Iss. 9. pp. 1089–1115. DOI: 10.1002/adma.201003753.
13. Popova A. N., Klimenkov B. D., Grabovskiy A. Yu. Scientific school for plasma nanotechnology and energy at the Mining University. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2021. Vol. 29, No. 2. P. 317–336. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-317-336.
14. Atif R., Shyha I., Inam F. Mechanical, thermal, and electrical properties of graphene-epoxy nanocomposites. A review. *Polymers*. 2016. Vol. 8, Iss. 8. DOI: 10.3390/polym8080281.
15. Voznyakovskii A. P., Vozniakovskii A. A., Kidalov S. V. New way of synthesis of few-layer graphene nanosheets by the self propagating high-temperature synthesis method from biopolymers. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12, Iss. 4. DOI: 10.3390/nano12040657.
16. Ellis B. Introduction to the chemistry, synthesis, manufacture and characterization of epoxy resins. *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*. Dordrecht : Springer, 1993. 327 p. DOI: 10.1007/978-94-011-2932-9_1.
17. Pascault J.-P., Willams R. J. J. Epoxy polymers: new materials and innovations. Weinheim : WILEY-VCH, 2010. 367 p.
18. Zahed Ahmadi. Epoxy in nanotechnology: A short review. *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 132. pp. 445–448.
19. Smirnova O. M., Menéndez-Pidal I., Alekseev A. V., Petrov D. N. et al. Strain hardening of polypropylene microfiber reinforced composite based on alkali-activated slag matrix. *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 4. pp. 2–22. DOI: 10.3390/ma15041607.
20. Feshchenko R. Y., Eremin R. N., Erokhina O. O., Dydin V. M. Phosphate solutions wetting of graphite blocks for magnesium electrolysis to enhance their oxidation resistance. Part 1. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 49–54.
21. Alattar A. L., Bazhin V. Y. Al–Cu–B4C composite materials for the production of high-strength billets. *Metallurgist*. 2020. Vol. 64, Iss. 5–6. pp. 566–573. DOI: 10.1007/s11015-020-01028-2.
22. Vinogradova A., Gogolinskii K., Umanskii A., Alekhovich V., Tarasova A., Melnikova A. Method of the mechanical properties evaluation of polyethylene gas pipelines with portable hardness testers. *Inventions*. 2022. No. 7. P. 125. DOI: 10.3390/inventions7040125.
23. Potapov A. I., Kondratev A. V. Non-destructive testing of multilayer medium by the method of velocity of elastic waves hodograph. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243, Iss. 3. pp. 348–356. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.348.
24. Potapov A. I., Kondratev A. V., Smorodinskii Y. G. Nondestructive testing of structurally inhomogeneous composite materials by the method of elastic-wave velocity hodograph. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. No. 6. pp. 434–442. DOI: 10.1134/S106183091906007X.
25. 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.
26. Prokopchuk N. R., Syrkov A. G., Klyuev A. Y., Laptik I. O. Modification of the model compound with nanodiamond particles for precise investment casting of metal articles. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 6. pp. 59–63.
27. Mikhailov A. V., Fedorov A. S. Analysis of the screw press mouthpiece parameters for 3d extrusion of peat pieces of tubular type. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249, Iss. 5. pp. 351–365.
28. Vasiliev N. I., Ivanov I. P. Optimization of gear pairs according to stress levels and specific slip of teeth on blocking contours. *Journal of Mining Institute*. 1986. Vol. 108. pp. 17–21.
29. Petrov D. N. Determination of strength parameters of concrete with polymer fiber. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 204. pp. 236–239.
30. Perveitalov O. G., Nosov V. V., Borovkov A. I., Khanukhov K. M. et al. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow. *Metals*. 2023. Vol. 13, Iss. 1. DOI: 10.3390/met13010004.
31. Grigorev E. V., Nosov V. V. Improving quality control methods to test strengthening technologies: A multilevel model of acoustic pulse flow. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Iss. 9. DOI: 10.3390/app12094549.
32. Zhurkov S. N. Kinetic concept of the strength of solids. *International Journal of Fracture*. 1984. Vol. 26, Iss. 4. pp. 295–307. DOI: 10.1007/BF00962961.
33. Korshunov A. I., Novikov S. A. Influence of the scale effect on endurance parameters. *Strength of Materials*. 1990. Vol. 22. pp. 1003–1006.
34. Morris D. G. Strengthening mechanisms in nanocrystalline metals. *Nanostructured Metals and Alloys*. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier, 2011. pp. 299–328.
35. Regel V. R. Kinetic theory of strength as a scientific basis for predicting the lifetime of polymers under load. *Polymer Mechanics*. 1971. Vol. 7. pp. 82–93.
36. Zhurkov S. N., Regel V. R., Sanfirova T. Effect of active additives on the time-temperature dependence of polymer strength. *Polymer Science USSR*. 1965. Vol. 7, Iss. 8. pp. 1486–1491.