



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

2.6.17. – Материаловедение (технические науки)

УДК 678

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026



## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Айсен Анатольевич Кычкин<sup>1</sup>, Анатолий Константинович Кычкин<sup>2</sup>,  
Алексей Геннадьевич Туисов<sup>3</sup>, Михаил Петрович Лебедев<sup>4</sup>,  
Елена Сергеевна Ананьева<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

<sup>1</sup> icen.kychkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>

<sup>2</sup> kychkinplasma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

<sup>3</sup> tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0000>

<sup>1,3,4</sup> Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН, Якутск, Россия

<sup>4</sup> m.p.lebedev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0086-9921>

<sup>5</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

<sup>5</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup> eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

**Аннотация.** Исследовано влияние углеродных нанотрубок (УНТ) на свойства эпоксидного связующего. При помощи электронномикроскопических исследований показано изменение надмолекулярной структуры с образованием упорядоченных структур при введении углеродных наночастиц в эпоксидное связующее на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя изо-метила-тетрагидрофталевого ангидрида (Изо-МТГФА). Проанализирована возможность и эффективность применения ультразвукового диспергирования УНТ в объеме связующего. Проведены исследования влияния содержанием УНТ от 0 до 0,5 масс. % в составе эпоксидного связующего на предел прочности и модуль упругости при растяжении и сжатии, ударную вязкость по Шарпи. Установлено, что при введении УНТ в состав эпоксидного связующего наблюдается изменение вязко-упруго-прочностных свойств. Экспериментально определено, что модификация концентратом на основе УНТ ведет к увеличению модуля упругости при растяжении и сжатии и ударной вязкости. При содержании УНТ в составе эпоксидного связующего в интервале 0,25 масс. % – 0,5 масс. %, наблюдается увеличение модуля упругости при растяжении на 32 % и модуля упругости при сжатии на 10 %.

**Ключевые слова:** эпоксидное связующее, углеродные нанотрубки, модификация, предел прочности, модуль упругости, ударная вязкость, связующее, РЭМ, разрушение, ультразвук, суспензия.

**Благодарности:** Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра и лично сотрудникам ИФТПС СО РАН Семенову С.В. и Тихонову Р.П. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2022-0001) с использованием научного оборудования ЦКП Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН в рамках реализации мероприятий по гранту № 13.ЦКП.210016.

**Для цитирования:** Влияние углеродных нанотрубок на упруго-прочностные свойства эпоксидного связующего / А. А. Кычкин [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 201–207. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/AOIQRТ>.

Original article

## INFLUENCE OF ONE-WALL CARBON NANOTUBES ON THE ELASTIC-STRENGTH PROPERTIES OF EPOXY BINDING

Aisen Kychkin<sup>1</sup>, Anatoliy K. Kychkin<sup>2</sup>, Aleksei G. Tuisov<sup>3</sup>, Mikhail P. Lebedev<sup>4</sup>, Elena S. Anan'eva<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> V. P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

<sup>1</sup> icen.kychkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>

<sup>2</sup> kychkinplasma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

<sup>3</sup> tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0000>

<sup>1,3,4</sup> Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Yakutsk, Russia

<sup>4</sup> m.p.lebedev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0086-9921>

<sup>5</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

<sup>5</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup> eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

**Abstract.** The article reflects the results of studies on influence of carbon nano tubes (CNT) on the elastic- strength properties of epoxy resin. Electronic-microscopic researches show the change of supramolecular structure with formation of well-organized structures at introduction carbon nano particles in epoxy binder on the basis of epoxy resin of ED-20 and isomethyl - tetrahydrothalic anhydride (iso-MTGFA) was chosen as a hardening agent. Possibility and effectiveness of use of ultrasonic dispersion of superconcentrate on basis of CNT in the composition of resin was analysed. Research of influence of CNT concentration from 0 to 0,5 mass% in the composition of epoxy resin on the tensile strength and module of elasticity at tension and compression, Charpy impact strength is carried out. It was established that when introducing CNT into the composition of epoxy resin changes of elastic-strength properties are observed. It was experimentally determined that modification by means of superconcentrate on basis of CNT results in increase of tensile strength and module of elasticity at tension and compression, Charpy impact strength. At CNT concentration in the epoxy resin composition from 0,25 mass% to 0,5 mass% increase of tensile strength at tension on 32% and module of elasticity at compression on 10 % is observed.

**Keywords:** epoxy binder, carbon nanotubes, modification, tensile strength, modulus of elasticity, impact strength, binder, SEM, destruction, ultrasound, suspension.

**Acknowledgements:** We express our gratitude to the Center for Collective Use of the FRC YSC SB RAS for the opportunity to conduct research on the scientific equipment of the Center and personally to the staff of the IFTPS SB RAS Semenov S.V. and Tikhonov R.P. The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FWRS-2022-0001) using the scientific equipment of the Central Collective Use Center of the Federal Research Center of the Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences as part of the implementation of activities under grant No. 13.ЦКП.210016.

**For citation:** Kychkin, A., Kychkin, A.K., Tuisov, A.G., Lebedev, M.P. & Anan'eva, E.S. (2023). Influence of one-wall carbon nano-tubes on the elastic-strength properties of epoxy binding. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 201-207. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/AOIQRT>.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные композиционные материалы открывают широкие возможности для развития и совершенствования конструкций, благодаря своим уникальным высоким удельным упруго-прочностным характеристикам, малой удельной массе, они с успехом конкурируют с такими «традиционными» конструкционными материалами, как сталь и

202

различные металлические сплавы.

В то же время сдерживающим фактором широкого применения армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) в высоконагруженных и высокопрочных конструкциях является невысокая вязкость разрушения и трещиностойкость полимерной матрицы, которая должна обеспечивать достижение максимальных прочностных харак-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2023

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

теристик композита и удовлетворять комплексу технологических и эксплуатационных требований. Особенно эта проблема проявляется при использовании в качестве основы полимерного связующего эпоксидных смол. Известно, что именно длительная прочность связующего определяет долговечность ПКМ, при которой обеспечивается его монолитность в процессе эксплуатации под влиянием различных постоянных и знакопеременных нагрузок. Решением данной проблемы может быть либо разработка новых полимерных матриц, либо модификация уже существующих.

Одним из перспективных методов повышения физико-механических свойств связующих является модификация углеродными наноматериалами (углеродными нанотрубками, нановолокнами, наночастицами). Обладая удельным низким весом, пластичностью и термической стабильностью размеров, углеродные наноматериалы являются перспективным материалом для создания новых высокоэффективных композиционных материалов.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве объекта модификации выбрано связующее горячего отверждения ЭДИ на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 с ангидридным отвердителем Изо-МТГФА. Модифицирующая добавка – углеродные нанотрубки (УНТ) – применялась в виде суспензии эпоксидной смолы, содержащего 1 масс. % углеродных нанотрубок. На рисунке 1 показаны снимки порошка УНТ при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ) на аппарате JEOL JSM 7800F.

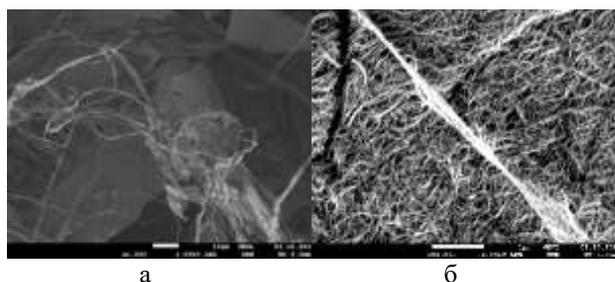


Рисунок 1 – Изображение РЭМ УНТ порошка «TUBALL™» при увеличении  $\times 1000$  (а),  $\times 20000$  (б)  
Figure 1 – SEM image of CNT powder "TUBALL™" at magnification  $\times 1000$  (a),  $\times 20000$  (b)

Условием положительного влияния модификации на свойства полимерной матрицы является равномерное распределение в ней частиц модификатора. Дезинтеграции частиц является актуальной технологической задачей. Равномерное объемное распределение частиц, мобилизация их индивидуального структурного и электронного потенциала на

целевое взаимодействие с объектом наномодифицирования (граница раздела фаз) являются основными проблемными этапами нанотехнологии. Трудность равномерного распределения связана не только с энергетической активностью наночастиц, но и с процессом их седиментации в вязкой среде.

Для разрушения сил, связывающих агрегаты, наиболее эффективной является предварительная подготовка растворов и/или суспензии с добавками наночастиц. В качестве дисперсной среды для получения одномерной композиции и достижения относительно равномерного распределения частиц УНТ была выбрана эпоксидная смола ЭД-20.

Для формирования одномерной композиции с модификатором в объеме связующего проводилось диспергирование частиц при помощи ультразвукового аппарата «ВОЛНА» УЗТА-1/22-ОРв при интенсивности  $15 \text{ Вт/см}^2$  в течение 240 минут

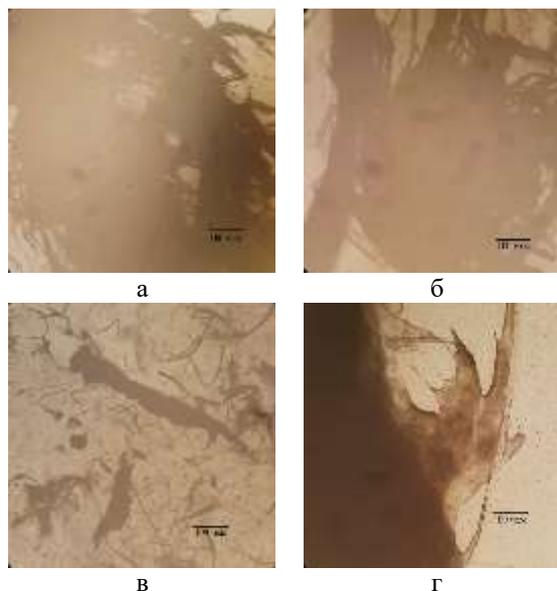


Рисунок 2 – Распределение частиц УНТ в смоле, где а – без ультразвуковой обработки (УО), б – с УО в течение 60 мин., в – с УО в течение 120 мин., г – с УО в течение 240 мин

Figure 2 - Distribution of CNT particles in the resin, where a - without ultrasonic treatment (UT), b - with UR for 60 min., c - with UR for 120 min., d - with UR for 240 min

После диспергирования образцы суспензии исследовались на седиментационную устойчивость путем экспонирования образцов в нормальных условиях в течение суток с последующей оценкой их оптической прозрачности на просвет и наличие осадка.

Для оценки влияния ультразвуковой обработки суспензия исследовалась на оптическом микроскопе, чтобы оценить равномерность рас-

пределения частиц в объеме смолы (рисунок 2).

Данные рисунка 2 свидетельствуют, что при ультразвуковой обработке эпоксидной смолы с УНТ наблюдается дезагломерирование частиц при УО 240 мин.

После приготовления суспензии проводится стадия дозирования растворов необходимых компонентами заданных количественных отвердителя, эпоксидно-диановой смолы, ускорителя и происходит процесс смешивания. Состав эпоксидного связующего с добавлением модификаторов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав эпоксидного связующего с добавлением модификаторов

Table 1 – Title of the table

УНТ	Компоненты, вес. %			
	Суспензия 1% УНТ	Эд–20	Изо–МТГФА	УП 606/2
0	0	56,7±0,5	42,5±1,5	0,8±0,2
0,01	1±0,5	55,8±0,5	42,4±1,5	0,8±0,2
0,1	10±0,5	46,8±0,5	42,4±1,5	0,8±0,2
0,25	25±0,5	31,8±0,5	42,4±1,5	0,8±0,2
0,5	50±0,5	6,9±0,5	42,3±1,5	0,8±0,2

Оценка влияния модифицирующей добавки УНТ на упруго-прочностные свойства эпоксидного связующего оценивалась путем испытания образцов на растяжение (ГОСТ 11262-80), сжатие (ГОСТ 4651-2014) и ударную вязкость (ГОСТ 4647-80) при этом степень наполнения исследуемых образцов варьировалась от 0,05 до 0,50 масс. %. Отвержденные образцы испытывали на универсальной машине INSTRON модели 3369 с наибольшей предельной нагрузкой 50кН, ценой деления шкалы 0,01 кН и погрешностью силовой измерителя ±0,1 %. Структурные изменения оценивались по фрактограммам поверхностей разрушения, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Эпоксидная смола является довольно хрупким полимерным материалом, поэтому её разрушение инициируется локализацией напряжений на поверхности или в объёме образца. Этими местами являются дефекты, которые могли образоваться в процессе формирования образца, например, поры. В процессе нагружения материала напряжения локализуются в местах дефектов, и при превышении этих напряжений происходит образова-

204

ние и рост магистральной трещины, которая в конечном итоге приводит к его разрушению. Основной задачей введения модифицирующих добавок в эпоксидную матрицу является повышение вязкости разрушения связующего за счет создания структуры, эффективно сопротивляющейся зарождению и развитию структурной поврежденности [5].

Для ненаполненного полимера (рисунки 3, а и 3, в) поверхность разрушения достаточно однородна, трещина, распространяясь, не встречает серьезных задержек. Фрактографии поверхности разрушения наполненного УНТ эпоксидного связующего показали, что введение УНТ существенно изменяет надмолекулярную структуру, вызывает интенсивное структурообразование и формирование упорядоченных структур, содержащих новые образования совершенно иного качества, что отчетливо видно по характеру изменения поверхности разрушения модифицированных связующих (рисунок 3, б и 3, г).

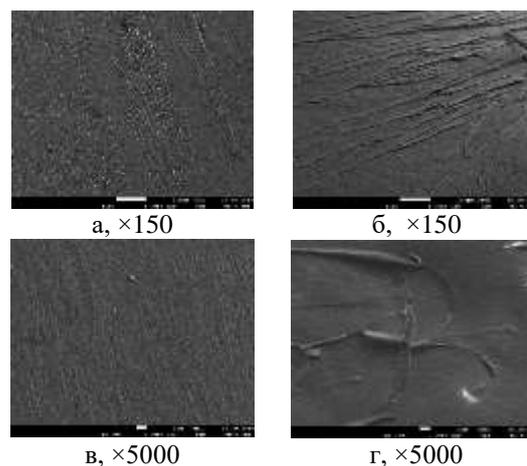


Рисунок 3 – Поверхность разрушения немодифицированного эпоксидного связующего (а, в) и модифицированного эпоксидного связующего (б, г) с содержанием УНТ 0,10 % масс.

Figure 3 - Destruction surface of an unmodified epoxy binder (a, c) and a modified epoxy binder (b, d) with a CNT content of 0.10% wt.

Поверхность разрушения модифицированного эпоксидного связующего отличается наличием ступеней («чешуек») разрушения, которые свидетельствуют, о том, что УНТ создают препятствия на пути продвижения фронта развития структурной поврежденности. Ожидаемо повышение вязкости разрушения модифицированных образцов. Кроме того, УНТ определенным образом (радиально) ориентируют области связующего, тем самым изменяя распределение напряжений на локальных участках. Взаимодействие этих полей напряжений между собой при относительно равномерном распределении УНТ в объеме связующего формируют физический

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

каркас, который может способствовать увеличению прочности на сжатие и изгиб. При этом прочность на растяжение уменьшается

Результаты испытаний представлены на рисунках 4–6.

Анализ результатов исследований показывает, что оптимально эффективной, в рам-

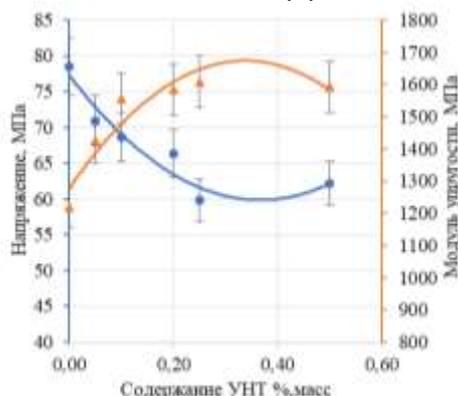


Рисунок 4 – Зависимость напряжения и модуля упругости при растяжении от содержания УНТ  
Figure 4 – Dependence of stress and tensile modulus on CNT content

ках проведенных исследований, является степень наполнения 0,10 масс. %. В данной точке наблюдается одновременный рост упруго-прочностных характеристик – модулей упругости при сжатии и растяжении, прочности при сжатии и ударной вязкости.

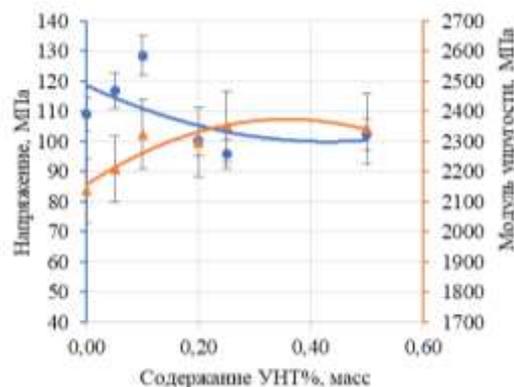


Рисунок 5 – Зависимость напряжения и модуля упругости при сжатии от содержания УНТ  
Figure 5 – Dependence of stress and compressive modulus on CNT content

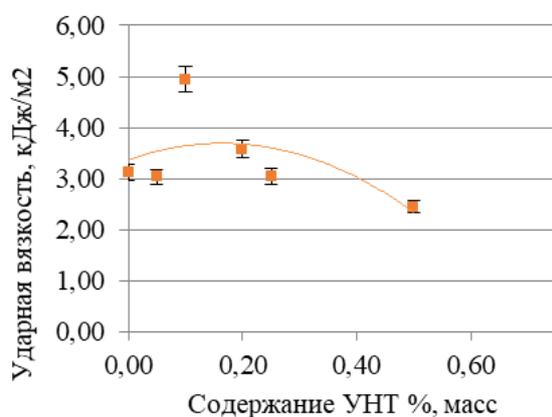


Рисунок 6 – Зависимость ударной вязкости от содержания УНТ  
Figure 6 – Dependence of impact strength on CNT content

Тенденция снижения прочности на растяжение объяснима и понятна, УНТ создают стерические ограничения и формируют физический каркас, сдерживающий предельно возможные деформации, которые были характерны для немодифицированного связующего. Сравнительные результаты исследования эффективности модификации эпоксидного связующего добавкой УНТ представлены в таблице 2.

Стабильность и воспроизводимость достигаемых эффектов очень чувствительны к однородности распределения и степени диспергируемости УНТ, которые присутствуют в системе в виде агломератов различных размеров. Следовательно, одним из ключевых вопросов при оценке эффективности модификации является вопрос о распределении и размерах УНТ в объеме.

Таблица 2 – Сравнительные результаты испытаний

Table 2 – Comparative test results

УНТ масс %	Напряжение при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Напряжение при сжатии, МПа	Модуль упругости при сжатии, МПа
0,00	78±7,0	1216±85	3,12±0,4	109±12	2135±64
0,05	71±6,0	1425±84	3,03±0,35	116±12	2207±55
0,10	68±5,50	1555±95	4,94±0,40	128±11	2324±60
0,20	66±5,50	1583±77	3,58±0,35	100±8	2297±67
0,25	59±4,55	1608±82	3,05±0,28	95±7	2348±70
0,50	62±5,00	1592±98	1,95±0,17	102±11	2343±65

## ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые образцы эпоксидного связующего показали, что при добавлении УНТ наблюдается увеличение модуля упругости при растяжении и сжатии. При содержании УНТ в составе эпоксидного связующего в интервале 0,25 масс. % – 0,5 масс. % наблюдается увеличение модуля упругости при растяжении на 32 % и модуля упругости при сжатии на 10 %.

На снимках поверхности разрушения наблюдаются микротрещины, формирующиеся в матрице под действием локальных напряжений. При взаимодействии с частицами модификатора начинают активно ветвиться, благодаря чему на поверхности разрушения происходит фрагментация матрицы с более мелким шагом по сравнению с немодифицированным эпоксидным связующим. В результате энергия, передаваемая образцу при деформировании, рассеивается на большем количестве структурных элементов, тем самым увеличивая работу разрушения.

Существенное увеличение значения ударной вязкости наблюдается при содержании УНТ в составе эпоксидного связующего в количестве 0,10 масс. % и составляет  $4,94 \pm 0,40$  кДж/м<sup>2</sup>, относительно  $3,12 \pm 0,4$  кДж/м<sup>2</sup> чистого эпоксидного связующего без добавления УНТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью РЭМ показано образование центров концентрации напряжения, в качестве которых выступают частицы модификатора. Они формируют в объеме связующего каркас частиц, которые повышают жесткость структуры и соответственно эффективность сопротивления сжимающим нагрузкам.

При переизбытке частиц гетерогенность приводит не только к локальному ветвлению трещины, но и к хрупкому разрушению упрочненных фрагментов.

Полученные результаты механических испытаний свидетельствуют, что положительный эффект проявляется при модификации УНТ – от 0,1 и до 0,2 % масс., и дальнейшее их увеличение приводит к снижению прочностных показателей.

## Информация об авторах

А. А. Кычкин – научный сотрудник лаборатории Композиционных материалов Арктики и Субарктики ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

А. К. Кычкин – к.т.н., ведущий научный сотрудник отдела физикохимии материалов и технологий ИФТПС СО РАН.

А. Г. Туисов – к.т.н., старший научный сотрудник Лаборатории Композиционных

материалов Арктики и Субарктики ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

М. П. Лебедев – чл.-корр. РАН, д.т.н. главный научный сотрудник отдела физикохимии материалов и технологий ИФТПС СО РАН.

Е. С. Ананьева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Современные специальные материалы» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, доцент кафедры «Наноконпозиционные материалы» Новосибирского государственного университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Iartsev V.P., Podolsk M.A. (2014). Composites on the basis of polyester resin with polymeric additions. *Announcer TGTU* (3) pp.557-563. (In Russ.).
2. Sokolenko I.V. (2014). Perspective fillers for the polyester composites. The International scientific research 2–4, pp. 92–93. (In Russ.).
3. Vigdorovich V.I. (2013). Carbon nanomaterials and composites on their basis. *Announcer of the Tambov university. Series: Natural and technical sciences* 4. pp. 1220–1228. (In Russ.).
4. Vereshagin A.L. (2001). Ultrafine diamonds of detonation synthesis. *Biisk: Pub. of Altaj State Technical University*. pp. 177. (In Russ.).
5. Putilov A.V. (2002). Nanomaterials and nanotechnologies are a breach in the future. *Engineering-chemical science for advanced technologies*. M. : Science, pp. 284. (In Russ.).
6. Marakhovsky P.S., Kondrashev S.V., Akatenkov R.V., Aleksashin V.M. and others (2015). On the modification of heat-resistant epoxy binders with carbon nanotubes. *Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman*. (2), p. 118–127 (In Russ.).
7. Domun N., Hadavinia H., Zhang T., Sainsbury T., Liaghata G.H. & Vahida S. (2015). Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials – a review of the current status. *Nanoscale*, (7), p.10294–10329.
8. Inam F. and Luhyna N. Carbon Nanotubes for Epoxy Nanocomposites. A Review on Recent Developments. *In proceeding of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications*. Wrexham, UK, 2012. p. 80–86.
9. Moosa A.A., Ramazani A.S.A., Ibrahim M.N. (2015). Effects of Carbon-Nanotubes on the Mechanical and Electrical Properties of Epoxy Nanocomposites. *International Journal of Current Engineering and Technology*, (5), p. 3253.
10. Muhammad Ismail A.H., Risby M.S., Ali A., Sapuan S.M. & Hoque M.E. (2015). Flexural strength and fracture toughness of carbon Nanotubes (CNTs) reinforced epoxy composites. *In Proceedings of Seventh The IIER International Conference*. Singapore. p. 44–48.
11. Mohamed I., Saleh N.J., Mohmoud L.H. (2015). Studying the Mechanical Properties of Epoxy

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК  
НА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Carbon Nanotubes Composite. *College of Engineering Journal (NUCEJ)*, (1), p. 84–90.

**Information about the authors**

*Aisen Kychkin - Researcher of the Laboratory of Composite Materials of the Arctic and Subarctic, Federal Research Center "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences».*

*A.K. Kychkin - Ph.D. Tech, Leading Researcher of the Department of Physical Chemistry of Materials and Technologies, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

*A.G. Tuisov - Ph.D. Tech, Senior Researcher at the Laboratory of Composite Materi-*

*als of the Arctic and Subarctic, Federal Research Center "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences".*

*M.P. Lebedev - Corresponding Member RAS, Doctor of Technology, Chief Researcher of the Department of Physical Chemistry of Materials and Technologies, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

*E.S. Anan'eva - Ph.D. Tech., Associate Professor of the Department of Modern Special Materials, Polzunov Altai State Technical University, Associate Professor of the Department "Nanocomposite Materials" of Novosibirsk State University.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.*

*The article was received by the editorial board on 12 Jan 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.*