

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 667.5.033.33 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_186

*А. И. Азоян, Д. С. Мантуров, Д. Н. Шишияну, С. А. Данильченко***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Изучено влияние температуры на физико-механические свойства композиционного материала. В качестве матрицы полимерного композита использовалась эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 с применением разных типов наполнителей. Экспериментальные данные были получены методами инструментального индентирования и термического анализа. Для оценки степени ползучести материала использовалось относительное изменение глубины индентирования. По полученным интегральным термогравиметрическим кривым было определено количественное изменение массы образца в процессе разложения, а по дифференциальным термогравиметрическим кривым – температурный интервал деструкции, температура начала и конца разложения. Показано, что введение наполнителей в полимерную матрицу оказывает существенное влияние не только на вязкоупругие свойства, но и на термическую устойчивость в результате структурных превращений и изменения подвижности молекул.

Ключевые слова: композит, вязкоупругость, индентирование, термогравиметрия.

Для цитирования: Экспериментальное исследование влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала / А. И. Азоян, Д. С. Мантуров, Д. Н. Шишияну, С. А. Данильченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 186–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_186.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется способам повышения эксплуатационных свойств полимерных композиционных материалов. Полимерные композиты находят широкое применение в тяжелонагруженных узлах трения, так как могут работать в широком диапазоне тепловых и механических воздействий, имея хорошую структурно-термическую адаптивность. Дальнейшее расширение функциональных возможностей полимера возможно при введении модификаторов в матричную структуру материала [1–4]. Учитывая совместимость вводимого наполнителя с основой, а также его свойств, можно создавать композиционные материалы, которые сочетают низкий коэффициент трения, повышенный модуль упругости и долговечность с высокой износостойкостью, эластичностью и прочностью исходного полимера.

В процессе трибосопряжения у композиционных материалов наблюдается резкое повышение реологических свойств, ведущих к необратимым изменениям физико-механических параметров [5–10]. При использовании полимерных композитов в зоне повышенных нагрузок следует учитывать такой важный фактор, как температура. Анализ ее влияния на изменение физико-механических свойств позволяет установить, что существуют определенные диапазоны, в которых происходят резкие изменения характеристик материала. Причиной этого являются различные структурные превращения и изменение подвижности молекул в данных температурных интервалах. Увеличение скорости подвижности различных участков макромолекул отражает области релаксации, которые, в свою очередь, определяют макроскопические свойства полимеров [11].

Изучение вязкоупругих свойств композита в микро- и макромасштабах проводится с использованием методов механики сплошных сред, а определение напряженно-деформированного состояния – с помощью аналитических методов решения и различных вычислительных алгоритмов. Исследование влияния температуры на физико-механические свойства материала будем анализировать с помощью двух разных подходов: метода инструментального индентирования и метода термического анализа. Метод инструментального индентирования широко применяется для определения параметров линейных упругих и нелинейных материалов, а также для упругопластической и вязкоупругой среды. Данный метод имеет ряд преимуществ: небольшие требования к геометрическим параметрам образца вследствие локализованного поля исследования; простота проведения эксперимента; возможность исследовать материал на разной масштабной высоте поверхностного слоя, которая контролируется размером самого

индентора и зоны контакта его с образцом; процесс индентирования происходит без значительных повреждений композита. Благодаря таким преимуществам данный способ анализа физико-механических свойств композиционного материала вызывает большой интерес и является перспективным направлением [12–16].

Для оценки термической устойчивости материала используют методы термического анализа, такие как: термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальный термический анализ (ДТА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) [17]. По результатам испытаний можно сделать выводы о термическом разложении как полимера, так и композиционного материала на его основе, а также исследовать процессы старения и степень отверждения исследуемых материалов.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе приведены экспериментальные данные, по результатам которых оценивалось влияние гибридных наполнителей на физико-механические свойства композиционных материалов. Для основы композитов была выбрана эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20, которая является продуктом дифенилолпропана и эпихлоргидрина, обладает высокой пластичностью, термостойкостью, хорошей адгезией, стойкостью к механическим повреждениям и т.д. Чтобы улучшить механические свойства полимерной матрицы, в качестве наноразмерной добавки была выбрана мелкодисперсная шпинель железа, а для повышения антифрикционных качеств композита был применен политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки Ф4МБ, размеры частиц которых не превышали 50 нм.

После введения наполнителей в полученную смесь был добавлен отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА). Он представляет собой этиленамин после процесса олигомеризации, молекулярная масса которого варьируется в пределах 230–250 г/моль. Отверждение проводилось за счет автоматической циркуляции горячего воздуха (~95 °С) в течение 12 ч в суховоздушном шкафу.

В работе [18] исследовалось влияние концентрации наполнителей на физико-механические характеристики композита. Было установлено, что наилучшими свойствами композит обладает при концентрации наполнителей с массовой долей 6 %. Исследования проводились на специально подготовленных образцах с разным составом: первый вариант – контрольный – представляет собой смолу марки ЭД-20 без наполнителей; второй вариант – в полимерную матрицу вводили 6 % мелкодисперсной шпинели железа; третий вариант модификации – ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ. Для проведения испытаний все образцы подвергались идентичной обработке.

Анализ физико-механических характеристик композита проводился на приборе NanoTest 600. Данное оборудование оснащено алмазным индентором в виде трёхгранной пирамиды Берковича. Индентирование осуществлялось с помощью трапецеидального режима нагружения при максимальной нагрузке $P = 200$ мН и скорости нагружения $V = 10$ мН/с. Время нагрузки и разгрузки всегда составляло 20 с. Значения времени выдержки варьировались в пределах t_B : 5, 30, 60, 90 и 120 с. Погружение индентора в исследуемый материал происходило линейно.

Определение степени ползучести материала проводилось с помощью программного комплекса NanoTest Platform 3. Для оценки вязкоупругих характеристик использовалось относительное изменение глубины индентирования:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100\% ; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2)$$

где h_1 – глубина индентирования при достижении испытательной нагрузки, поддерживаемой постоянной с момента t_1 ; h_2 – глубина индентирования после выдержки под нагрузкой к моменту времени $t_2 = t_1 + t_B$; x_i – экспериментально полученные значения; \bar{x} – математическое ожидание; n – количество наблюдений.

С целью определения зависимости вязкоупругих характеристик от нагрева был проведен аналогичный эксперимент с временем выдержки t_B : 300, 900, 1800, 2700 и 3600 с при температуре образца 25, 60, 85 и 100 °С.

Композиционные материалы широко применяются в тяжелонагруженных узлах трения, а повышение температуры при эксплуатации может достигать критических значений. Поэтому большой интерес представляет изменение физико-механических свойств композитов в зависимости от температуры. Термический анализ осуществлялся на высокочувствительном дериватографе STA 449 F3 Jupiter фирмы NETZSCH с использованием программного обеспечения Netzsch Proteus Analyses. Исследование проводилось в закрытых вентилируемых корундовых тиглях в атмосфере азота со скоростью 10 °С/мин при непрерывном нагревании от 30 до 650 °С. Навески образцов для анализа составляли 10–20 мг. По полученным интегральным термогравиметрическим кривым (ТГ) было определено количественное изменение массы образца в процессе разложения, а по дифференциальным термогравиметрическим кривым (ДТГ) – температурный интервал деструкции, температура начала и конца разложения, а также все ступени эндотермического эффекта. Пики на кривой ДТГ позволили определить температуру, при которой разложение происходит с максимальной скоростью.

Результаты экспериментальных исследований

При исследовании физико-механических характеристик как для чистого полимера, так и для модифицированного были определены средние значения относительного изменения глубины индентирования под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_B и среднеквадратического отклонения (табл. 1), а на рис. 1 – аппроксимированные кривые полученных данных из расчета по формулам (1) и (2).

Таблица 1

Относительное изменение глубины индентирования и среднеквадратическое отклонение под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки

n	t_B, c	$C_{IT}, \%$	S
Смола ЭД-20			
1	5	1,97	0,209
2	30	4,71	0,522
3	60	5,89	0,282
4	90	6,88	0,524
5	120	7,67	0,853
Смола ЭД-20 + 6 % шпинель			
1	5	3,55	0,191
2	30	6,96	0,781
3	60	9,27	0,621
4	90	11,04	0,771
5	120	12,45	0,681
ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ			
1	5	1,36	0,169
2	30	3,18	0,305
3	60	4,21	0,211
4	90	4,89	0,299
5	120	5,18	0,488

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что стабильностью полученных данных как в отношении твердости и приведенного модуля упругости [18], так и ползучести обладает композиционный материал на основе смолы ЭД-20 с добавками в виде 6 % шпинели железа и 6 % ПТФЭ. При этом среднее значение относительного изменения глубины индентирования варьируется от 1,36 до 5,18 % (~ 3,82 %). Вместе с тем композиции смолы ЭД-20 и ЭД-20 с использованием в качестве наполнителя только шпинели железа демонстрируют большой разброс полученных данных C_{IT} : для смолы ЭД-20 от 1,97 до 7,67 % (~ 5,7 %), а при использовании мелкодисперсной шпинели в качестве наполнителя: 3,55–12,45 % (~ 8,9 %), что говорит о значительном увеличении вязких свойств композита.

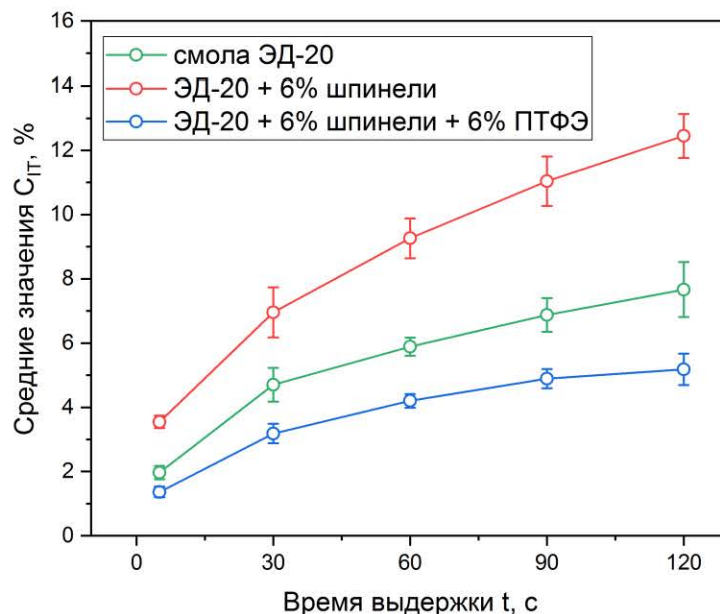


Рис. 1. Средние значения C_{IT} при разном времени выдержки t_B

На следующем этапе испытаний было исследовано влияние содержания наполнителя на термические превращения в полимерном композите. Процесс термического разложения у чистой смолы ЭД-20 проходит в одну стадию в интервале температур от 180 до 480 °С (рис. 2). Максимальная скорость деструкции равна 11,57 %/мин и наблюдается при температуре 364,06 °С, о чем свидетельствует пик на кривой ДТГ. Разложение происходит практически полностью, потеря массы образца составляет 94,03 %.

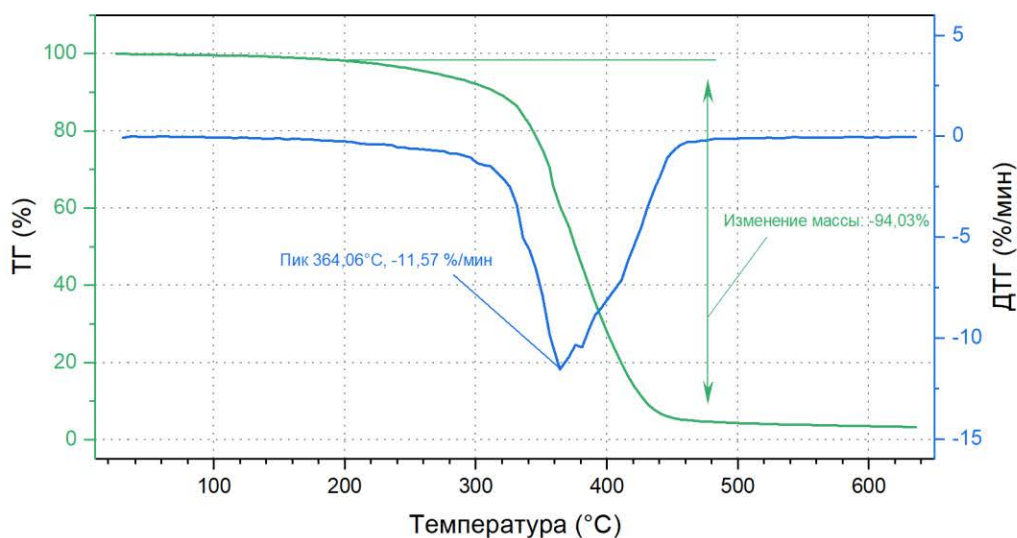


Рис. 2. Результаты термического анализа смолы ЭД-20

На рис. 3 представлены результаты термического анализа смолы ЭД-20 с добавлением 6 % шпинели железа в качестве наполнителя. Процесс разложения, как и в случае с ЭД-20 без добавок, одностадийный. Начало разложения смещается в область более высоких температур и составляет 315 °С. Максимальная скорость деструкции (23,45 %/мин) достигается при температуре 362 °С. Потеря массы образца прекращается при температуре 460 °С и составляет 65,93 %, что значительно меньше, чем у ЭД-20 без добавления шпинели.

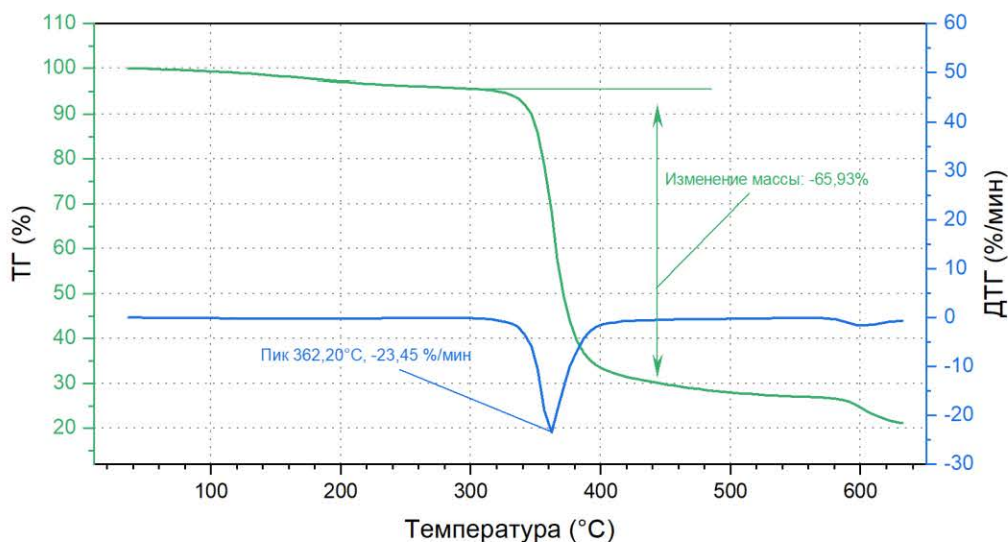


Рис. 3. Результаты термического анализа смолы ЭД-20 + 6 % шпинель

На рис. 4 у композиционного полимерного материала ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ отчетливо наблюдается два эндотермических эффекта. Первая ступень разложения происходит в интервале температур от 295 °С до 450 °С, которая значительно выше, чем у образца из чистой смолы ЭД-20, но ниже, чем у образца с добавлением только шпинели в качестве добавки. При этом максимальная скорость деструкции, равная 12,67 %/мин, достигается при температуре 369 °С, а потеря массы составляет 51,49 %. Второй эндотермический эффект начинается практически без смещения и проходит в интервале от 450 °С до 600 °С. Анализ кривой ДТГ показал, что при температуре 499 °С достигается максимальная скорость деструкции 1,91 %/мин. Потеря массы на кривой ТГ составляет около 11,79 %. Если принять во внимание, что процесс деструкции происходил в две стадии, то суммарная потеря массы образца равна 63,28 %, что значительно меньше, чем для чистой смолы ЭД-20 и ЭД-20 + 6 % шпинели. Обобщенные результаты термического анализа исследуемых материалов приведены в табл. 2.

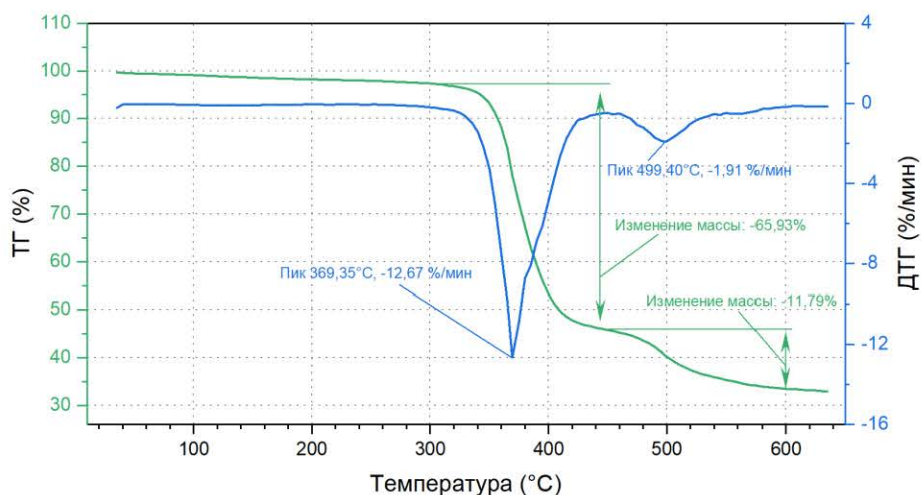


Рис. 4. Результаты термического анализа смолы ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ

На основании полученных данных дифференциального термического анализа исследуемых образцов можно говорить о том, что наибольшей термической устойчивостью обладает модифицированный полимерный материал ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. Термическая деструкция происходит при

более высокой температуре (от 369 °С), а скорость разложения при этом не достигает предельных значений (12,67 %/мин). Суммарное изменение массы за два эндотермических эффекта показало наименьшее значение и составило 63,28 %. Таким образом, добавление шпинели и ПТФЭ в материалы на основе эпоксидной смолы ЭД-20 повышает устойчивость этих материалов к термическому разложению.

Таблица 2

Обобщенные данные термического анализа материалов

№ п/п	Состав образцов	Период термической деструкции, °С	Максимальная скорость деструкции, %/мин	Потеря массы, %	
1	ЭД-20	180–480	11,57 при $t = 364$ °С	94	
2	ЭД-20 + 6 % шпинель	315–460	23,45 при $t = 362$ °С	65,93	
3	ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ	295–450	12,67 при $t = 369$ °С	51,49	63,28
		450–600	1,91 при $t = 499$ °С	11,79	

В процессе анализа результатов физико-механических и термических испытаний трех различных составов установлено, что для последующего исследования влияния температуры на вязкоупругие свойства следует выбрать композиционный материал ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. В табл. 3 представлены средние значения относительного изменения глубины индентирования и среднеквадратического отклонения под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_b . Аппроксимированные кривые полученных результатов из расчета по формулам (1) и (2) представлены на рис. 5.

Таблица 3

Относительное изменение глубины индентирования и среднеквадратическое отклонение для ЭД-20 + 6 % шпинели + 6% ПТФЭ при разной температуре в зоне контакта

n	t_b , с	C_{IT} , %	S
Температура 25 °С			
1	300	8,89	0,373
2	900	10,99	1,084
3	1800	13,21	2,284
4	2700	15,02	2,647
5	3600	16,73	2,906
Температура 60 °С			
1	300	9,41	0,366
2	900	11,51	1,016
3	1800	13,15	1,742
4	2700	14,65	2,013
5	3600	16,14	2,357
Температура 85 °С			
1	300	19,84	0,542
2	900	31,27	1,391
3	1800	39,31	1,166
4	2700	45,69	2,803
5	3600	50,69	5,014
Температура 100 °С			
1	300	36,99	0,981
2	900	55,62	2,262
3	1800	72,55	4,053
4	2700	85,65	4,465
5	3600	95,06	5,086

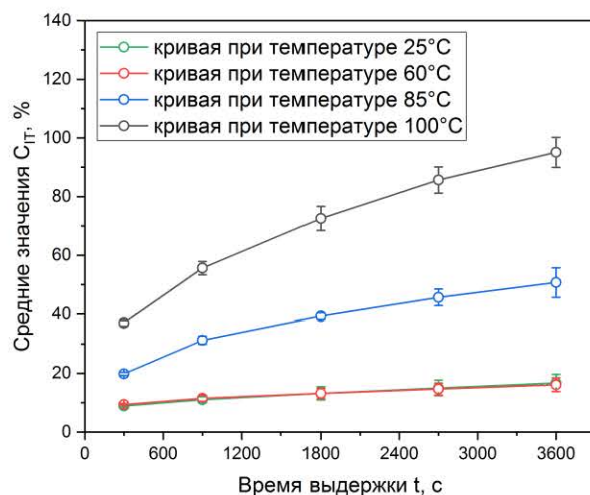


Рис. 5. Средние значения $C_{ПТ}$ для ЭД-20 + 6 % шпинели + 6% ПТФЭ при разной температуре в зоне контакта

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что композиционный материал обладает хорошей стабильностью данных в отношении ползучести для всего периода времени выдержки. При $t = 25^\circ\text{C}$ изменение глубины indentирования варьируется от 8,89 до 16,73 % (~ 7,84 %), а при $t = 60^\circ\text{C}$ разница значений коэффициента ползучести не превышает ~ 6,73 %. Дальнейшее повышение температуры ведет к увеличению вязких свойств полимерного композита. Результаты испытаний показали, что ползучесть материала под постоянной нагрузкой начинается задолго до полной термической деструкции.

Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала установлено следующее:

1 По сравнению с исходным полимером применение модифицированного материала позволяет существенно повысить прочностные характеристики и, как следствие, износостойкость. Из аппроксимированной кривой на рис. 1 видно, что при добавлении шпинели металлов и ПТФЭ в полимерную основу относительное изменение глубины indentирования меняется незначительно. Установившееся значение $C_{ПТ}$ при увеличении времени выдержки свидетельствует о релаксационной твердости.

2 Эпоксидно-диановая смола ЭД-20 с применением наполнителей в виде шпинели железа и политетрафторэтилена марки Ф4МБ обладает наибольшей термической устойчивостью: термическая деструкция по сравнению с образцами других составов происходит в два этапа при более высоких температурах от 369°C , скорость разложения при этом не достигает предельной величины (12,67 %/мин), суммарная потеря массы за два эндотермических эффекта показала наименьшее значение и составила 63,28 %.

3 В процессе идентификации влияния температуры на механические свойства материала наблюдается рост $C_{ПТ}$ с увеличением температуры. Зависимость вязкоупругих характеристик носит экспоненциальный характер.

Список литературы

1 Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д. М. Мордасов, П. В. Макеев, Д. Л. Полушкин [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 136–141. – DOI 10.17277/vestnik.2019.01.

2 Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б. А. Люкшин, С. В. Шилько, С. В. Панин [и др.]. – Новосибирск : Сибирское отделение РАН. – 2017. – 311 с. – ISBN 978-5-7692-1546-9.

References

1 Investigation of the structure of polymer composite material based on ED-20 resins and anodispersity of styrene copolymer and acrylic acids / D. M. Mordasov, P. S. Makeev, D. L. Polushkin [et al.] // Vestnik Tambov State Technical University. – 2019. – Vol. 25. – No. 1 – P. 136–141. – DOI 10.17277/vestnik.2019.01.

2 Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes: monograph / B. A. Lyukshin, S. V. Shilko, S. V. Panin [et al.]. – Novosibirsk : Siberian Branch of the RAS. – 2017. – 311 p. – ISBN 978-5-7692-1546-9.

- 3 Paluvai, N. R. Synthesis and modifications of epoxy resins and their composites : A review / N. R. Paluvai, S. Mohanty, S. K. Nayak // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2014. – Vol. 53. – No 16. – P. 1723–1758.
- 4 Исследование кинетики и механизма формирования вторичных структур модифицированной эпоксидной смолы / Д. С. Мантуров, П. Г. Иваночкин, А. И. Азоян [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 4 (88). – С. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_41.
- 5 Исследование вязкоупругих свойств композиционных материалов на основе метода индентирования / В. И. Колесников, О. А. Беляк, Т. В. Суворова [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2023. – № 4 (92). – С. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.
- 6 Chyasnovichyus, M. Probing of polymer surfaces in the viscoelastic regime / M. Chyasnovichyus, S. L. Young, V. V. Tsukruk // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30. – No. 35. – P. 10566–10582. – URL: <https://doi.org/10.1021/la404925h> (дата обращения: 18.01.2024).
- 7 Zhai, M. Viscoelastic modeling of nanoindentation experiments : A multicurve method / M. Zhai, G. B. McKenna // *J. Polymer Sci. B. Polymer Phys.* – 2014. – Vol. 52. – No. 9. – P. 633–639. – URL: <https://doi.org/10.1002/polb.23470> (дата обращения: 18.01.2024).
- 8 Measurement of viscoelastic properties for polymers by nanoindentation / Y. Wang, L. Shang, P. Zhang [et al.] // *Polymer Test*. – 2020. – Vol. 83. – P. 106353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106353> (дата обращения: 18.01.2024).
- 9 Stan, F. Analysis of viscoelastic behavior of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites by instrumented indentation / F. Stan, A. M. Turcanu, C. Fetecau // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12. – No. 11. – P. 2535. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym12112535> (дата обращения: 18.01.2024).
- 10 Parvini, C. H. Extracting viscoelastic material parameters using an atomic force microscope and static force spectroscopy / C. H. Parvini, M. A. S. R. Saadi, S. D. Solares // *Beilstein J. Nanotechnology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 922–937. – URL: <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.77> (дата обращения: 18.01.2024).
- 11 Исследование зависимости свойств модифицированных полиуретанов от температуры методом индентирования / Е. В. Торская, А. А. Яковенко, И. В. Шкалей [и др.] // *Физическая мезомеханика*. – 2023. – Т. 26. – № 3. – P. 29–38. – DOI 10.55652/1683-
- 3 Paluvai, N. R. Synthesis and modifications of epoxy resins and their composites : A review / N. R. Paluvai, S. Mohanty, S. K. Nayak // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2014. – Vol. 53. – No 16. – P. 1723–1758.
- 4 Investigation of kinetics and mechanism of secondary structures' formation of modified epoxy resin / D. S. Manturov, P. G. Ivanochkin, A. I. Azojan [et al.] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2022. – No. 4 (88). – P. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_41.
- 5 Study of viscoelastic properties of composite materials on the basis of indentation method / V. I. Kolesnikov, O. A. Belyak, T. V. Suvorova [et al.] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2023. – No. 4 (92). – P. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.
- 6 Chyasnovichyus, M. Probing of polymer surfaces in the viscoelastic regime / M. Chyasnovichyus, S. L. Young, V. V. Tsukruk // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30. – No. 35. – P. 10566–10582. – URL: <https://doi.org/10.1021/la404925h> (date of access: 01/18/2024).
- 7 Zhai, M. Viscoelastic modeling of nanoindentation experiments : A multicurve method / M. Zhai, G. B. McKenna // *J. Polymer Sci. B. Polymer Phys.* – 2014. – Vol. 52. – No. 9. – P. 633–639. – URL: <https://doi.org/10.1002/polb.23470> (date of access: 01/18/2024).
- 8 Measurement of viscoelastic properties for polymers by nanoindentation / Y. Wang, L. Shang, P. Zhang [et al.] // *Polymer Test*. – 2020. – Vol. 83. – P. 106353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106353> (date of access: 01/18/2024).
- 9 Stan, F. Analysis of viscoelastic behavior of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites by instrumented indentation / F. Stan, A. M. Turcanu, C. Fetecau // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12. – No. 11. – P. 2535. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym12112535> (date of access: 01/18/2024).
- 10 Parvini, C. H. Extracting viscoelastic material parameters using an atomic force microscope and static force spectroscopy / C. H. Parvini, M. A. S. R. Saadi, S. D. Solares // *Beilstein J. Nanotechnology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 922–937. – URL: <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.77> (date of access: 01/18/2024).
- 11 An indentation study of the temperature-dependent properties of modified polyurethanes / E. V. Torskaya, A. A. Yakovenko, I. V. Shkaley [et al.] // *Physical Mesomechanics*. – 2023. – Vol. 26. – No. 3. – P. 29–38. – DOI 10.55652/1683-

C. 29–38. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_3_29.

12 Исследование методом микроиндентирования образцов эпоксидной смолы, упрочненной наночастицами диоксида кремния / С. В. Смирнов, Е. О. Смирнова, И. А. Веретенникова [и др.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2017. – № 1. – С. 24–35. – DOI 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035.

13 An overview of microscale indentation fatigue : Composites, thin films, coatings, and ceramics / Md. M. Islam, S. I. Shakil, N. M. Shaheen [et al.] // *Micron*–2021. – Vol. 148. – No. 18 – 22 p. – DOI 10.1016/j.micron.2021.103110.

14 Оценка влияния отвердителя на механические свойства эпоксидных покрытий на основе смолы ЭД-20 / С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, Д. А. Коновалов [и др.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – № 1. – С. 6–16. – DOI 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016.

15 Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova [et al.] // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019)*. – 2019. – 22 p. – DOI 10.1063/1.5135120.

16 Belyak, O. A. Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // *Mechanics of Composite Materials*. – 2021. – Vol. 57. – No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

17 Menczel, J. D. Thermal Analysis of Polymers : Fundamentals and Applications / J. D. Mencze, R. B. Prime // John Wiley & Sons, Incorporated. – 2014. – 2009. – 698 p. – DOI 10.1007/s10973-010-1071-7.

18 Механические и трибологические характеристики модифицированной эпоксидной смолы наноразмерной шпинелью железа / П. Г. Ивановкин, С. А. Данильченко, Д. С. Мантуров [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 3 (87). – С. 6–17. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_6.

805X_2023_26_3_29.

12 Studying epoxy resin reinforced with silica dioxide nanoparticles by microindentation / S. V. Smirnov, E. O. Smirnova, I. A. Veretennikova [et al.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2017. – No. 1. – P. 24–35. – DOI 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035.

13 An overview of microscale indentation fatigue : Composites, thin films, coatings, and ceramics / Md. M. Islam, S. I. Shakil, N. M. Shaheen [et al.] // *Micron*–2021. – Vol. 148. – No. 18 – 22 p. – DOI 10.1016/j.micron.2021.103110.

14 Effect of hardeners on the mechanical properties of epoxy coatings based on ED-2 resin // S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, D. A. Konovalov [et al.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – No. 1. – P. 6–16. – DOI 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016.

15 Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova [et al.] // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019)*. – 2019. – 22 p. – DOI 10.1063/1.5135120.

16 Belyak, O. A. Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // *Mechanics of Composite Materials*. – 2021. – Vol. 57. – No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

17 Menczel, J. D. Thermal Analysis of Polymers : Fundamentals and Applications / J. D. Mencze, R. B. Prime // John Wiley & Sons, Incorporated. – 2014. – 2009. – 698 p. – DOI 10.1007/s10973-010-1071-7.

18 Studies of epoxy resin modified by nanoscale iron spinel / P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko, D. S. Manturov [et al.] // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2022. – No. 3 (87). – P. 6–17. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_6.

A. I. Azoyan, D. S. Manturov, D. N. Shishiyanu, S. A. Danilchenko

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF A COMPOSITE MATERIAL

Abstract. The influence of temperature on the physical and mechanical properties of the composite material has been studied. As the matrix of the polymer composite, epoxy-diane resin of the ED-20 brand was used using different types of fillers. The experimental data were obtained by instrumental indentation and thermal analysis. A relative change in indentation depth was used to estimate the creep rate of the material. Based on the obtained integral ther-

mogravimetric curves of TG, a quantitative change in the mass of the sample during decomposition was determined, and based on differential thermogravimetric curves of DTG, the temperature range of destruction, the temperature of the beginning and end of decomposition were determined. It has been shown that the introduction of fillers into the polymer matrix has a significant effect not only on viscoelastic properties, but also on thermal stability as a result of structural transformations and changes in the mobility of molecules.

Keywords: composite, viscoelasticity, indentation, thermogravimetry.

For citation: Experimental study of the influence of temperature on the physico-mechanical properties of a composite material / A. I. Azojan, D. S. Manturov, D. N. Shishiyanu, S. A. Danilchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 186–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_186.

Сведения об авторах

Азоян Анаид Иосиповна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», младший научный сотрудник, e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Мантуров Дмитрий Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», заведующий лабораторией, кандидат технических наук, e-mail: manturovds@rgups.ru

Шишияну Дарья Николаевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Химия», кандидат технических наук, доцент, e-mail: erm@rgups.ru

Данильченко Сергей Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», младший научный сотрудник,

Южный федеральный университет (ЮФУ)

Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, лаборатория механики деформируемых тел и конструкций, младший научный сотрудник, e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com

Information about the authors

Azoyan Anaid Iosipovna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical Mechanics», Junior Researcher, e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Manturov Dmitriy Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical Mechanics», Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: manturovds@rgups.ru

Shishiyanu Dariya Nikolayevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Chemistry», Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, e-mail: erm@rgups.ru

Danilchenko Sergey Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Theoretical Mechanics», Junior Researcher,

Southern Federal University (SFU),

Institute for Mathematics, Mechanics and Computer Sciences named after I. I. Vorovich, Laboratory for Mechanics of Deformable Bodies and Constructions, Junior Researcher, e-mail: sergey.a.danilchenko@gmail.com