

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Pang, H. Conductive polymer composites with segregated structures [Text] / H. Pang, L. Xu, D.X. Yan, Z.M. Li // Progress in Polymer Science. – 2014. – Vol. 39, No. 11. – P. 1908-1933.
2. Kropotin, O.V. Structure and phase composition of electrically conductive carbon black [Text] / O.V. Kropotin, S.N. Nesov, D.A. Polonyankin, E.A. Drozdova // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2182, No. 1. – P. 012076.
3. Чухчин, Д.Г. Способ дифрактометрического определения степени кристалличности веществ [Текст] / Д.Г. Чухчин, А.В. Малков, И.В. Тышкунова [и др.] // Кристаллография. – 2016. – Т. 61, №. 3. – С. 375-379.
4. Раздьяконова, Г.И. Свойства и методы анализа углеродных материалов: монография [Текст] / Г.И. Раздьяконова, Л.Г. Пьянова, Ю.В. Суровикин, В.А. Лихолобов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 176 с.

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА

Кудина Е.Ф.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>БелГУТ, Гомель, Беларусь; <sup>2</sup>ИММС НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

[kudina\\_mpri@tut.by](mailto:kudina_mpri@tut.by)

“COMPOSITE MATERIALS BASED ON PHENYLONE”

Для практического применения пластмасс часто требуется, чтобы изделие обладало, с одной стороны, способностью значительно деформироваться и не разрушаться при больших нагрузках, а с другой – при умеренных нагрузках противодействовать внешним силам, сохранять размеры и форму. Эти требования, как правило, могут быть удовлетворены только частично. По комплексу физико-механических показателей большинство термопластов превосходит фенилон (ФС), получаемый на основе ароматических полиамидов. Преимущество фенилона заключается в том, что материалы на его основе сочетают высокую тепло- и термостойкость с морозостойкостью, жесткость и прочность с хорошими антифрикционными свойствами, пластичностью и стойкостью к ударным нагрузкам, высокую усталостную прочность со стабильными диэлектрическими характеристиками, что обеспечивает возможность их широкого применения в различных отраслях народного хозяйства. Однако высокие значения коэффициента трения в сухом режиме ограничивают его эксплуатационные возможности. Введение в состав ФС в качестве наполнителей твердых смазок приводит к улучшению антифрикционных свойств фенилона, но способствует снижению прочности материала. Существующие недостатки выдвигают задачи для разработки эффективных методов модифицирования фенилона с целью направленного регулирования его свойств.

Проведено исследование влияния на свойства фенилона терморасширенного графита (ТРГ) и синтезированного органосиликатного нанокompозита [1-3]. В качестве связующего использовали полиамид фенилон С-2 – линейный гетероциклический сополимер, содержащий в основной цепи амидную группу –  $\text{HNCO}$ , соединенную с двух сторон фенильными фрагментами. Введение ТРГ в композит на основе ФС позволит обеспечить существенное улучшение износостойкости и антифрикционных свойств. Терморасширенный графит получен из естественного графита при окислении персульфатом аммония в сернокислой среде с последующей термообработкой при температурах до 1200 К. В качестве органосиликатного наполнителя использовали высокодисперсный продукт, полученный при интеркалировании  $\text{C}_0$  в эпоксиликатную матрицу ( $\text{C}_0 \rightarrow \text{ЭС}$ ), которая сформирована при модифицировании щелочесиликатного раствора эпоксидиановой смолой ЭД-20. Синтезированный продукт («эпоксиликат кобальта») имеет гибридно-смешанную структуру, где в эпоксиликатных нанокластерах ( $\text{ЭС-Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ ,  $\text{ЭС-Na}_6\text{Si}_3\text{O}_{19}$ ) распределены нанодисперсные аморфные и кристаллические частицы ( $\beta\text{-Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$  размером от 5 до 50 нм и  $\text{CoSiO}_3$ ,  $\text{CoSi}_2\text{O}_5$  размером 15-25 нм). Исследуемые наполнители вводили в термопласт в концентрации до 15 мас.% [1, 2]. Выбор высокодисперсного органосиликатного продукта обусловлен его структурными особенностями, которые обеспечивают высокую активность дисперсных частиц и улучшение адгезионного взаимодействия на границе раздела полимерное связующее – наполнитель.

Введение ТРГ обеспечивает, по сравнению с традиционными графитами, повышение теплофизических, физико-механических и триботехнических свойств композитов, полученных на основе фенилона. Анализ экспериментальных данных показывает, что при увеличении содержания наполнителя ТРГ теплофизические свойства (теплопроводность, температуропроводность и ТКЛР) композита улучшаются, а физико-механические, наоборот, как и следовало ожидать, ухудшаются.

Наименьший коэффициент трения для данных условий ( $PV=3$  МПа·м/с) по результатам триботехнических характеристик наблюдается в материале при содержании наполнителя 5 мас.%, но при этом его износ в 5 раз больше, чем у графитопласта, который содержит 15 мас.% ТРГ. Следует указать, что данное значение критерия  $PV$  для графитопласта с 5 мас.% ТРГ является предельным, в то время как материалы с наполнителем в количестве 15 и 25 мас.% работают при  $PV < 25$  МПа·м/с.

Проведенные исследования показали, что модифицирование фенилона исследуемыми наполнителями приводит к повышению термостойкости композиционных материалов (КМ). Термостойкость композиционных материалов на основе ФС зависит от соотношения вводимых наполнителей. Анализ полученных данных показывает, что увеличение содержания ТРГ во всех композициях приводит к возрастанию термостойкости ( $T_0$ ,  $T_5$ ,  $T_{10}$  и  $T_{20}$ ), наиболее эффективное воздействие отмечается при введении наполнителя в количестве 15 мас.%. Содержание наполнителя состава  $C_0 \rightarrow ЭС$  меньше влияет на изменение термостойкости материала и наиболее оптимальным содержанием наполнителя является концентрация не более 8 мас.%.

Анализ физико-механических свойств полученных композитов показал, что увеличение концентрации ТРГ в смеси двух наполнителей приводит к уменьшению значений предела прочности и модуля упругости при сжатии, однако при увеличении концентрации «эпоксисиликата кобальта» предел прочности при сжатии уменьшается, а модуль упругости растет.

Анализ влияния режимов эксплуатации (давление и скорость скольжения) на триботехнические характеристики материала с оптимальным содержанием наполнителя (состав: ТРГ/ЭС $C_{C_0}=8/8$ ) по комплексу теплофизических и механических характеристик дает основание сделать следующие выводы: износ и температура в зоне контакта изменяются аналогично, а коэффициент трения антибатно росту давления и скорости скольжения; при одинаковых значениях  $PV$  температура в зоне контакта ниже при большей скорости, т.е. когда время фрикционного контакта меньше.

Триботехнические исследования композита при наиболее оптимальном соотношении наполнителей позволили установить, что при одинаковых значениях  $PV$  температура в зоне контакта ниже при более высокой скорости, т.е. когда время фрикционного контакта меньше (табл. 1). Поверхность образцов композитов в исследованном интервале нагрузок стекловидная, что характерно для усталостного механизма изнашивания.

Таблица 1 – Зависимость температуры в зоне контакта от режимов эксплуатации

Показатели	$PV = 1,6$ МПа·м/с	
	Скорость скольжения, $V$ (м/с)	2
Давление, $P$ (МПа)	0,8	10
Температура в зоне контакта, $T$ (К)	372,5	377

Сравнение результатов изнашивания КМ при смазке водой и маслом (табл. 2) позволяет отдать предпочтение маслу. Картина изнашивания КМ аналогична наблюдаемой при армировании фенилона органическими волокнами: ариимид-Т, сульфон-Т и вниивлон.

Таблица 2 – Износ материала на основе фенилона

Материал	Износ в условиях трения при смазке, мг					
	водой			маслом		
	при нагрузке, МПа					
	2,5	5,0	$I_{5,0}/I_{2,5}$	2,5	5,0	$I_{5,0}/I_{2,5}$
Фенилон	37,5	348,75	9,3	0,35	0,77	2,2
Композит*	1,56	8,6	5,5	0,125	0,275	2,2

\* – фенилон, модифицированный гибридным наполнителем (8 мас.% ТРГ и 8 мас.% состава ЭС $C_0$ )

Таким образом, разработанный материал можно рекомендовать для эксплуатации при значениях фактора  $PV$  в режимах: сухого трения – 1,6; при смазке водой – 2,5 и маслом 5,0 МПа·м/с.

Полученные результаты показали, что совместное использование наполнителей приводит к их взаимному активированию и синергическому эффекту, позволяющему широко варьировать теплофизические, физико-механические и триботехнические свойства материала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и*

технологии» подпрограммы «Многофункциональные и композиционные материалы» (задание 4.1.16).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Kudina, E.F. Nanostructured organosilicate composites: Production, properties and application [Text] / E.F. Kudina, G.G. Pechersky // Resin Composites: Properties, Production and Applications. – 2011. – P. 101-127.
2. Kudina, E.F. Modification of alkali silicate solutions by organic reagents and investigation of the properties of the final products [Text] / E.F. Kudina, Y.M. Pleskachevskii // Glass Physics and Chemistry. – 2009. – Vol. 35. – P. 436-442.
3. Кудина, Е.Ф. Влияние эпоксисиликата кобальта и терморасширенного графита на теплофизические свойства фенолона [Текст] / Е.Ф. Кудина, А.И. Буря, Ю.М. Плескачевский [и др.] // Вопросы химии и химической технологии. – 2008. – №. 6. – С. 66-71.

### **МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

**Лепов В.В., Бисонг М.С., Павлов Н.В., Дьячковский И.И., Иванов А.Н., Попов Д.Н.**

*ИФТПС СО РАН, г. Якутск, Россия*

[lepov@iptpn.ysn.ru](mailto:lepov@iptpn.ysn.ru)

#### **“MULTI-LEVEL SIMULATION OF MATERIAL FAILURE AND COMPLEX SYSTEMS OPERATING IN EXTREME CONDITIONS”**

Длительный мониторинг протяжённых конструкций и фундаментов сооружений, а также натурные испытания конструкций и экспериментальные исследования элементов машин показали, что поврежденность элементов металлоконструкций, подвергающихся длительным циклическим нагрузкам, включая температурные и коррозионные воздействия в экстремальных климатических условиях практически достигает своих предельных значений, при этом ресурс технических систем вырабатывается значительно раньше, чем при эксплуатации в условиях умеренного климата. Это касается в первую очередь регионов Арктики и Субарктики, для которых требуется корректировка соответствующих норм и стандартов, на основе методов оценки и продления ресурса, повышения надёжности и безопасности сложных систем, конструкций и сооружений, эксплуатирующихся на территории криолитозоны, моделирования процессов накопления повреждений в материалах.

Химия и материаловедение, металлургия, машиностроение, транспортная и энергетическая отрасли решают, как принципиально разные, так и взаимосвязанные задачи, общими для которых являются фундаментальные физические законы и принципы, определяющие предельные свойства структур и оптимальные комплексы свойств конструкционных и функциональных материалов.

Отдельный интерес представляет физика вязко-хрупкого перехода повреждённых сталей, которая, вообще говоря, достаточно сложна даже для описания стандартных испытаний на ударный изгиб [1-3]. Тем не менее, попытки, основанные, в частности, на уравнениях дислокационной кинетики подойти к анализу параметров вязко-хрупкого перехода при ударном нагружении облученных нейтронами конструкционных сплавов мартенситного типа позволяют количественно обосновать наблюдаемые на опыте закономерности [4]. Так, работа вязкого разрушения образца с надрезом (типа Шарпи) составляет часть работы разрушения гладкого образца и соответствует объему материала в области надреза, вовлеченного в процесс пластической деформации и разрушения. Как для гладкого, так и для надрезанного образца определяющим фактором их вязкого разрушения является величина равномерной деформации [5]. Поэтому с ростом общего упрочнения, во многих случаях неравномерного из-за тепловых и динамических воздействий, она будет значительно, вплоть до нуля, уменьшаться, снижая величину ударной вязкости материала [2].

Микроструктурный анализ изломов образцов из материала локомотивного колеса показал, что сталь после эксплуатации находится в термоупрочненном состоянии, однако в исходном состоянии обладала достаточной пластичностью. Под действием циклических переменных силовых нагрузок и температурных перепадов в экстремальных климатических условиях её фазовая структура деградирует, что проявляется в виде пористых и трещиноватых форм излома. Низкая температура эксплуатации приводит к преобладанию хрупкого механизма разрушения. В теле зерна создаются внутренние напряжения, способствующие образованию субмикротрещин и хрупкому разрушению.

Таким образом, с использованием рассмотренного подхода к оценке хладостойкости можно получить необходимые сведения при выборе материала с оптимальными механическими характеристиками и микроструктурой при внедрении в эксплуатацию ответственных узлов и деталей транспортных средств, путем микроструктурного анализа характера разрушения материала при разных