

## Биодеструкция полимерных композиционных материалов микроскопическими грибами

© 2018. Э. Х. Сакаева, к. т. н., доцент,  
Ю. В. Куликова, к. т. н., доцент,  
Л. В. Рудакова, д. т. н., профессор,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,  
e-mail: elya2182@mail.ru

Показана возможность биологической деструкции полимерных композиционных материалов на примере стеклопластиков на основе фенолоформальдегидной смолы и стекловолокна (марки АГ – 4 и ДСВ), органопластики (марки ОП-ЖА) и углепластиков (УП-Урал-Тр-СФ, УТЗФ2УМН, ЭПАН-2Б) микроскопическими грибами. Степень биодеструкции зависит от состава полимерных композиционных материалов. Наименее стойкими к биодеструкции являются органопластики на основе эпоксидных компонентов. Выявлено, что основными биодеструкторами полимерных композитных материалов являются представители микроскопических грибов *Penicillium chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*, *Aspergillus terreus*, *A. niger*, *A. oryzae*. Уровень стойкости полимерных композиционных материалов к воздействию плесневых грибов по ГОСТ 9.049-91 варьировал от 4 до 5 баллов.

**Ключевые слова:** биодеструкция, микроскопические грибы, грибостойкость, полимерные композиционные материалы.

## Biodegradation of polymeric composite materials by microscopic fungi

© 2018. E. Kh. Sakaeva ORCID 0000-0001-8303-668X,

Yu. V. Kulikova ORCID 0000-0002-0896-4571,

L. V. Rudakova ORCID 0000-0003-3292-8359,

Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy Prospect, Perm, Russia, 614990,  
e-mail: elya2182@mail.ru

The objects of research were polymer composite materials (PCM) based on various reinforced materials and binders: fiberglass, organoplastics and carbon plastics. The program of experimental studies included three stages. At the first stage, studies were conducted to identify groups of microorganisms involved in the biodegradation of PCM. The second stage of the research is devoted to determining the generic and species belonging to microorganisms obtained in the first stage. At the third stage, the efficiency of the process of biological destruction of PCM by isolated groups of microorganisms was evaluated. Determination of groups of microorganisms involved in biodegradation was carried out by seeding on liquid nutrient substrates. Fungi resistance was determined in accordance with GOST 9.049-91.

The main groups of microorganisms developing on the surface of composites are representatives of the genus *Penicillium* (*P. chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*) and the genus *Aspergillus* (*A. niger*, *A. terreus*, *A. oryzae*). The evaluation of the fungi resistance showed that the PCM are non-resistance, so the growth of the fungi is estimated at 4 to 5 points. The epoxy matrix is the least fungi resistant, whereas the phenol-formaldehyde matrix more resistant to fungal destructors. The results of the study shows the advisability of biodegradation technology with microscopic fungi using for the utilization of polymeric composite materials based on epoxy and phenol-formaldehyde resins reinforced with glass, carbon or organic fibers.

**Keywords:** biodegradation, mold fungi, fungi resistance, polymeric composite materials.

В мире, в том числе в России, наблюдается резкий рост объёма производства композиционных материалов, которые используются в различных отраслях промышленности. В

2016 г. в мире произведено 8,8 млн тонн композиционных материалов [1]. Производство и эксплуатация изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) приводит к

образованию существенного объёма отходов, в виде препрегов, обрезки при раскройке изделий, избытков смол и вышедших из употребления изделий. Суммарный мировой объём накопления композиционных материалов, по оценкам экспертов, составляет порядка 4 млн т/год [2]. Размещение данных отходов в окружающей среде приводит к существенной нагрузке ввиду их длительного срока разложения – до 200 лет [3, 4].

В литературных источниках [5–7] имеются отрывочные данные о кинетике процесса биоразложения композиционных материалов в окружающей природной среде. В литературе [4, 8] показана исключительная экологическая и санитарно-гигиеническая опасность ПКМ: при деструкции материалов, армированных углеродным волокном, формируется значительный поток наночастиц, обладающих существенной мобильностью и склонностью накопления в живых организмах [9]. Ряд работ посвящён изучению механизмов и возможных путей деструкции полимерных материалов [10–12], показывающий, что на процесс деструкции в существенной мере влияет тип армирующих волокон, применяемый тип отверждения, форма образцов, микробиологический состав инокулянта, наличие иных источников питания, влажность среды.

Исследования по участию микроскопических грибов в деструкции предварительно стерилизованных образцов композиционных материалов на основе эпоксидной смолы были проведены учёными Гарвардского и Дейтонского университетов [13]. Было установлено, что смесь микроскопических грибов активно использует смолу и частицы угольных волокон в качестве питательного субстрата. Авторами показана эффективность участия в биообращении и деструкции композитных материалов микроскопических грибов *Aspergillus versicolor*, *Cladosporium cladosporioides* и *Chaetomium* sp. в сравнении с бактериями [14].

В то же время неоспоримым преимуществом применения биологических методов для утилизации отходов производства и потребления, в том числе ПКМ, является их энергоэффективность, отсутствие токсичных продуктов разложения.

Анализ проблематики накопления отходов производства и использования изделий из ПКМ, а также обзор литературных данных в области поиска путей биологического разложения данных отходов, позволят говорить об актуальности исследований в данном направлении.

Цель настоящей работы заключалась в оценке возможности использования метода биодеструкции, как способа утилизации отходов полимерных композиционных материалов. На данном этапе исследований было важно оценить возможность использования биологических методов в технологии переработки полимерных композиционных материалов, выявить основные группы микроорганизмов, которые участвуют в процессе биодеструкции ПКМ и оценить их эффективность.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись ПКМ на основе разных наполнителей и связующих. Для эксперимента выбраны следующие ПКМ: стеклопластики, органопластики и углепластики, перечень которых представлен в таблице 1.

Программа экспериментальных исследований по изучению биодеструкции ПКМ включала три этапа. На первом этапе проводились исследования по выявлению групп микроорганизмов, участвующих в деструкции ПКМ. Второй этап исследований посвящён определению родовой и видовой принадлежности микроорганизмов, полученных на первом этапе. На третьем этапе оценивалась эффективность процесса биологической деструкции ПКМ выделенными группами микроорганизмов.

С целью определения групп микроорганизмов, участвующих в биодеструкции ПКМ, использован метод посева на жидкие элективные питательные среды (мясо-пептонный агар (МПА), среда Красильникова, среда Чапека). Для естественного биообращения опытных образцов ПКМ последние помещали в колбу с элективной средой и выдерживали от 5 до 20 сут. По окончании времени экспозиции оценивали рост микроорганизмов, с последующим пересевом на твёрдые питательные среды для дальнейшей идентификации микроорганизмов.

Идентификацию микроорганизмов проводили в соответствии со стандартными методиками и общепринятыми в микробиологической практике методами исследования.

На третьем этапе экспериментальных исследований проводили оценку эффективности биодеструкции ПКМ выделенными на первых этапах микроорганизмами с использованием микологического теста, основанного на определении устойчивости материала к воздействию культур плесневых грибов. Испытания образцов полимерного материала

Таблица 1 / Table 1

Перечень исследованных полимерных композитных материалов  
List of polymer composite materials

№	ПКМ / PCM	Состав ПКМ / PCM composition
1	Стеклопластик АГ-4 ГОСТ 20437 / Fiberglass AG-4 GOST 20437	Стекланные нити / glass threads Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
2	Стеклопластик ДСВ ГОСТ 17478 / Fiberglass DSV GOST 17478	Стекланные нити / glass threads Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
3	Органоластик ОП-ЖА / Organoplastic OP-GA	Органожгут Армос / Organogel Armos Эпоксидное связующее / epoxy binder
4	Углепластик УП-Урал-Тр-СФ / Carbon plastic UP-Ural-Tr-SF	Углеродный трикотаж / carbon knitwear Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
5	Углепластик УТЗФ2УМН / Carbon plastic UTZF2UMN	Углеродная ткань / carbon fabric Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder
6	Углеволокнит ЭПАН-2В / Carbon fiber EPAN-2B	Углеродное волокно / carbon fiber Феноло-формальдегидное связующее / phenol-formaldehyde binder

на способность служить источником питания для микроскопических и плесневых грибов проводят согласно ГОСТ 9.049-91 и ISO EN 846 [16, 17].

Согласно ГОСТ 9.049-91 продолжительность испытаний при оценке грибостойкости по изменению характерных показателей должна быть не менее 84 сут с промежуточными осмотрами через 30 и 60 сут. Длительность эксперимента составила 210 сут, с промежуточными осмотрами через 30 и 90 сут. В соответствии с ГОСТ 9.048-91 для изучения грибостойкости были использованы 5 образцов ПКМ каждой группы.

Грибостойкость (стойкость к воздействию плесневых грибов) ПКМ оценивали по интенсивности развития грибов на образцах под микроскопом по 6-балльной шкале согласно ГОСТ 9.048-91:

0 баллов – прорастание спор и конидий не обнаружено;

1 балл – в поле зрения проросшие споры и незначительно развитый мицелий;

2 балла – развитый мицелий, возможно спороношение;

3 балла – мицелий и (или) спороношение едва видны невооружённым глазом, но отчётливо видны под микроскопом;

4 балла – невооружённым глазом отчётливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25% испытываемой поверхности;

5 баллов – невооружённым глазом отчётливо видно развитие грибов, покрывающих более 25% испытываемой поверхности.

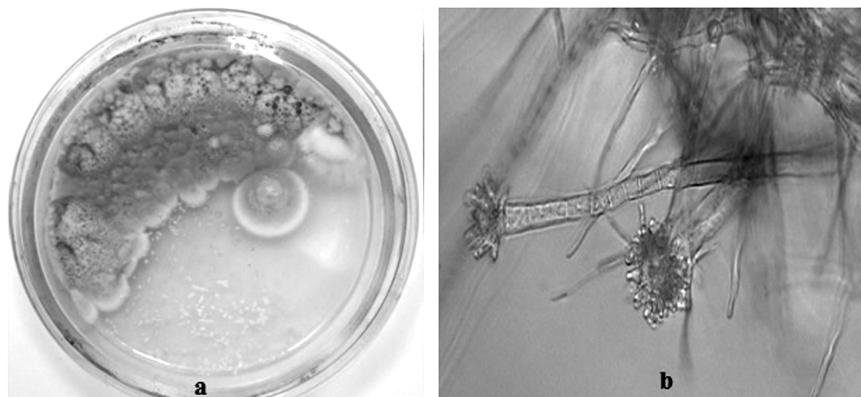
За результат исследований принимали максимальный балл, который установлен не менее чем для трёх образцов.

Степень деструкции ПКМ оценивали по визуальным признакам и с использованием оптической микроскопии.

### Результаты исследований и обсуждение

Первый этап экспериментальных исследований позволил получить накопительную культуру микроорганизмов, участвующих в естественном биообрастании опытных образцов ПКМ в элективных накопительных культурах. Наилучший рост микроорганизмов наблюдался в опытных образцах с питательной средой Чапека, в которой процесс биодegradации ПКМ ускоряется за счёт присутствия глюкозы, как легкодоступного источника углерода. Интерес представлял мицелий колоний грибов, образовавшихся как на поверхности среды, так и на поверхности ПКМ. Рост микроскопических грибов с развитием спороношения отмечался во всех опытных образцах, что свидетельствует о том, что ПКМ содержат питательные вещества, обеспечивающие развитие грибов. При этом стоит отметить, что интенсивность развития микроскопических грибов различна на разных видах композитов.

На средах МПА и Красильникова активного роста микроорганизмов не наблюдали. Поэтому второй этап исследований посвящён выделению и идентификации микроорганиз-



**Рис. 1.** Микроскопические грибы р. *Penicillium*, выделенные из накопительной культуры на среде Чапека: а – колонии на среде Чапека; б – микроскопическая картина  
**Fig. 1.** Microscopic fungi of g. *Penicillium* selected from accumulative culture on Chapek substratum: a – colony on Chapek substratum; b – microscopic picture

**Таблица 2 / Table 2**

Оценка грибостойкости материала по степени развития плесневых грибов  
 Evaluation of material fungi resistance according to the degree of development of mold fungi

Образец ПКМ Sample of PCM	Микроскопические грибы, выявленные на поверхности опытных образцов ПКМ Microscopic fungi found on the surface prototypes PCM	Степень развития грибов (балл) Degree of development of fungi (score)
Стеклопластик АГ- 4 ГОСТ 20437 Fiberglass AG-4 GOST 20437	<i>Aspergillus terreus</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>P. funiculosum</i>	4
Стеклопластик ДСВ ГОСТ 17478 Fiberglass DSV GOST 17478	<i>A. niger</i> , <i>A. oryzae</i> , <i>P. chrysogenum</i>	4
Органопластик ОП-ЖА Organoplastic OP-GA	<i>P. chrysogenum</i> , <i>A. terreus</i> , <i>A. niger</i> , <i>P. cyclopium</i>	5
Углепластик УП-Урал-Тр-СФ Carbon plastic UP-Ural-Tr-SF	<i>A. terreus</i> , <i>P. funiculosum</i> , <i>P. chrysogenum</i>	4
Углепластик УТЗФ2УМН Carbon plastic UTZF2UMN	<i>A. terreus</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>P. funiculosum</i>	4
Углеволокнит ЭПАН-2Б Carbon fiber EPAN-2B	<i>P. chrysogenum</i> , <i>P. cyclopium</i> , <i>A. niger</i>	4

мов, полученных в накопительной культуре на среде Чапека.

Основными группами микроорганизмов, развивающимися на среде Чапека, являлись микроскопические грибы, преобладающими родами которых были *Penicillium* и *Aspergillus*. Также в одной из накопительных культур с ПКМ (Углепластик УТЗФ2УМН) выделены грибы р. *Trichoderma*. На рисунке 2 представлены микроскопические грибы, выделенные на поверхности ПКМ из накопительной культуры.

Идентификация выделенных микроскопических грибов позволила определить шесть преобладающих видов, относящихся к двум родам *Penicillium* и *Aspergillus*: *P. chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*, *A. niger*, *A. terreus*, *A. oryzae*.

В накопительной культуре, помимо микроскопических грибов, выделены бактерии *Bacillus* sp. и *Pseudomonas* sp.

Также при изучении микробной сукцессии в накопительной культуре отмечены актиномицеты, которые используют минеральные формы азота. Выделены актиномицеты родов *Micromonospora* и *Streptomyces*. Актиномицеты способны, как и грибы, подвергать деструкции сложногидролизуемые органические субстраты.

Третий этап исследований был посвящён оценке биодеструкции ПКМ под действием микроскопических грибов. В соответствии с ГОСТ 9.048-91 композитный материал считается грибостойким, если степень роста на нём грибов не превышала 2 баллов. Результаты анализа показали, что ПКМ негрибостойкие,

так как рост грибов оценивается в 4–5 баллов. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Данные таблицы показывают, что интенсивность развития микроскопических грибов на поверхности образцов ПКМ непосредственно связана с химическим составом композита, например, наполнитель органожгут является источником углерода для микроскопических грибов. Кроме этого, в зависимости от структуры полимерной матрицы, наблюдается устойчивость к действию биодеструкторов. Наиболее доступной является эпоксидная матрица, тогда как феноло-формальдегидная матрица оказывается более устойчивой к воздействию грибов-деструкторов.

В таблице 2 также представлены данные о видовом составе грибов, рост которых наблюдали на поверхности опытных образцов ПКМ в процессе экспериментальных исследований (на 28 сут).

В процессе деструкции ПКМ участвовали представители микроскопических грибов родов *Aspergillus* и *Penicillium*. Выявлены представители рода *Penicillium* (*P. chrysogenum*, *P. funiculosum*, *P. cyclopium*), которые характеризовались интенсивным развитием мицелия и обильным спороношением. Данные виды развивались почти на всех образцах ПКМ в течение всего периода биодеструкции (210 сут).

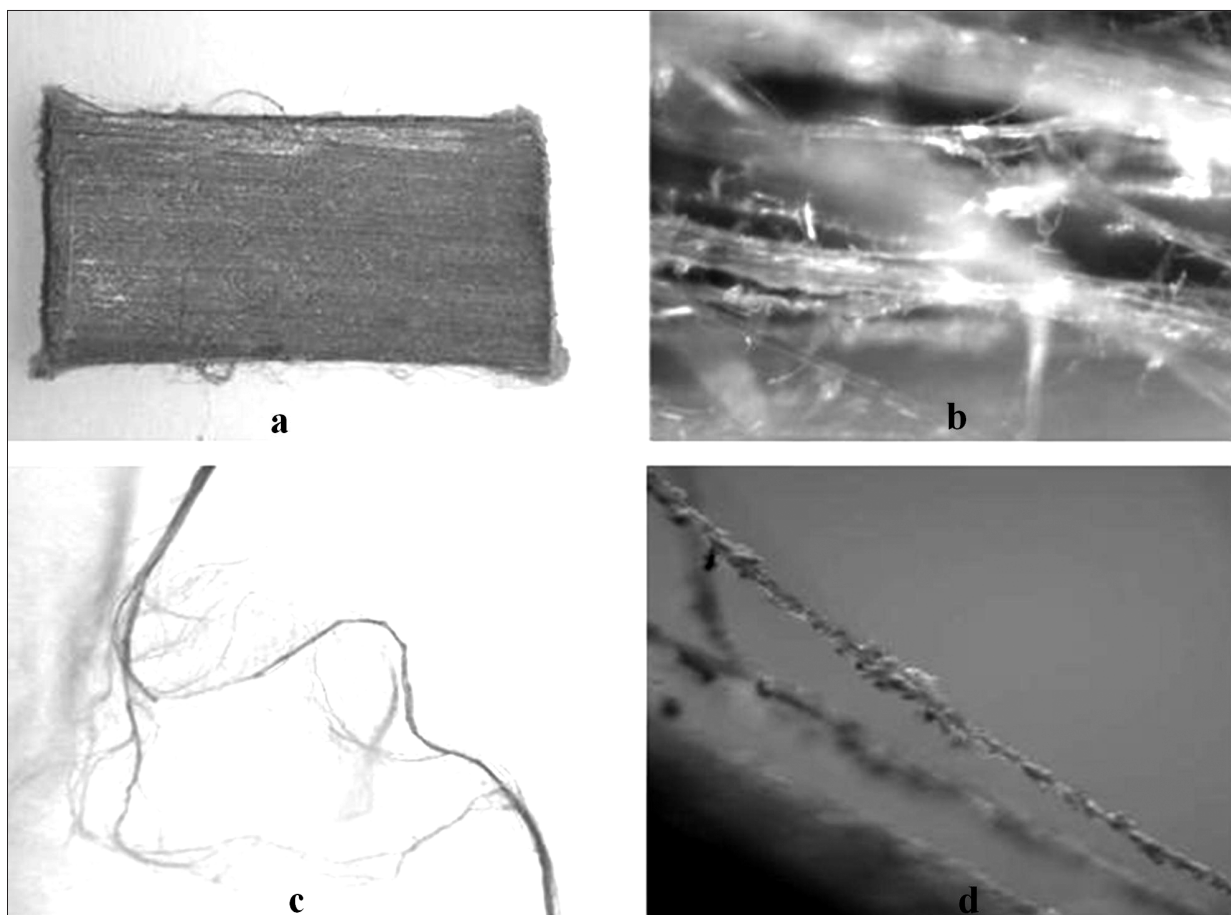
На поверхности образцов композитов на 90 сут экспозиции зафиксированы отдельные очаги мицелия *A. niger*. Также отмечены представители *A. terreus*, которые выявлены на многих образцах ПКМ, а также *A. oryzae*, который придавал красный оттенок стеклопластику ДСВ на ранних этапах экспонирования.

По окончании 210 сут экспозиции образцов ПКМ микроскопическими грибами, оценена степень деструкции опытных вариантов (визуально и с помощью стереомикроскопа).

Таблица 3 / Table 3

Результаты визуального контроля образцов при биодеструкции микроскопическими грибами  
Visual control results of composites particles during biodegradation with microscopic fungi

Образец ПКМ Sample of PCM	Описание изменений образцов ПКМ после эксперимента Description of change in PCM samples after experiment	
	90 сут экспозиции 90 days of exposition	210 сут экспозиции 210 days of exposition
Стеклопластик АГ-4 ГОСТ 20437 Fiberglass AG-4 GOST 20437	Изменение оттенка образца (покраснение), разрыхление материала и появление отдельных элементов стеклонитей Changing the hue of the sample (redness), and appearance of individual elements of glass	Разрыхление материала, большое количество высвободившегося стеклонитей Decondensation of the material, there are many free glass
Стеклопластик ДСВ ГОСТ 17478 Fiberglass DSV GOST 17478	Без изменений Unchanged	Высвобождение стеклонитей по всей поверхности образца Release of glass on the surface of the sample
Органопластик ОП-ЖА Organoplastic OP-GA	Наличие развитого мицелия грибов There are developed mycelium of fungi	Размягчение материала, обрастание мицелием грибов всей поверхности материала Softening of the material, there are developed mycelium of fungi
Углепластик УП-Урал-Тр-СФ Carbon plastic UP-Ural-Tr-SF	Без изменений Unchanged	Нарушение структуры ПКМ (крошится), высвобождение волокон ткани Violation of the structure of PCM (to crumble), release of the fibers
Углепластик УТЗФ2УМН Carbon plastic UTZF2UMN	Размягчение материала, высвобождение волокон ткани Softening of the material, release of the fibers	Материал рыхлый, высвобождение волокон ткани Loose material, release of the fibers
Углеволокнит ЭПАН-2В Carbon fiber EPAN-2B	Расслаивание материала Delamination of the material	Фактура материала осталась прежней, наблюдается расслаивание The structure of the former, there are delamination



**Рис. 2.** Внешний вид органопластика ОП-ЖА: а – внешний вид до начала эксперимента, б – микроскопическая картина поверхности (увеличение 20 x 6,3) до начала эксперимента, с – внешний вид после экспонирования в течение 7 месяцев, d – микроскопическая картина поверхности (увеличение 20 x 6,3) после экспонирования в течение 7 месяцев  
**Fig. 2.** Appearance of organic polymer composite OP-ZhA type: a – appearance before the beginning of the experiment, b – microscopic picture of the surface (magnification 20 x 6.3) before the experiment start, c – appearance after exposure for 7 months, d – microscopic picture of the surface (magnification 20 x 6.3) after exposure for 7 months

В таблице 3 представлены данные по визуальной оценке образцов ПКМ, подвергшихся биодеструкции микроскопическими грибами.

На рисунке 2 представлен образец органопластика ОП-ЖА, подвергшийся биодеструкции микроскопическими грибами в течение 210 суток.

Эксперимент по исследованию воздействия на образцы ПКМ микроскопических грибов позволил выявить качественные показатели деструкции. На первой стадии процесса деструкции происходит водопоглощение жидкой среды материалом, размягчение материала повышает доступность его к воздействию микроорганизмов. На второй стадии осуществляется прикрепление микроскопических грибов к поверхности полимерного композита и частичное проникновение мицелия вглубь материала. Далее происходит интенсивное

размножение микроскопических грибов, что свидетельствует об использовании микромицетами наполнителя как источника питания.

### Заключение

На основании проведённых исследований по биодеструкции полимерных композитных материалов можно сделать следующие выводы:

1. Полимерные композитные материалы подвержены деструкции микроскопическими грибами, при этом стойкость к воздействию плесневых грибов по ГОСТ 9.049-91 варьировала от 4 до 5 баллов по 6-балльной шкале. Наименее стойкими к биодеструкции являются органопластики на основе эпоксидного связующего.

2. Основными биодеструкторами полимерных композитных материалов являются *Penicillium* sp. и *Aspergillus* sp.: *P. chrysogea*

*num, P. funiculosum, P. cyclospium, A. terreus, A. niger, A. oryzae.*

3. Визуальная оценка степени деструкции ПКМ показала существенное изменение механических свойств материалов через 210 сут проведения эксперимента (размягчение, высвобождение волокон, расслаивание) при том, что в большинстве образцов на 90 сут эксперимента существенных изменений не отмечено.

Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования технологии биодеструкции с использованием микроскопических грибов для утилизации полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных и фенолформальдегидных смол, армированных стеклянными, угольными или органическими волокнами. Наиболее эффективно биологический метод может быть применён при переработке органопластиков с целью освобождения наполнителя (органожгута).

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия «Инициативные научные проекты», код заявки 5.9729.2017/8.9.*

### Литература

1. ПК «ИнПолимер» [Электронный ресурс] <http://www.inpolimer.ru/news/217/dolya-rossii-v-mirovom-rynke-kompozitov-sostavit-1/> (Дата обращения: 20.06.2018).
2. Mazumdar S., Karthikeyan D., Pichler D., Benevento M., Frassine R. State of the composites industry report for 2017 // *Composites Manufacturing*. 2017. January 2. [Электронный ресурс] <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/01/composites-industry-report-2017/4/> (Дата обращения: 20.06.2018).
3. Iwańczuk A., Kozłowski M., Łukaszewicz M., Jabłoński S. Anaerobic Biodegradation of polymer composites filled with natural fibers // *Journal of Polymers and the Environment*. June 2015. V. 23. No. 2. P. 277–282.
4. Bankim C.R., Rajesh K.P., Dinesh K.R. Fibrous polymeric composites: environmental degradation and damage. Boca Raton, CRC Press, 2018. 222 p.
5. Карамова Н.С., Надеева Г.В., Багаева Т.В. Методы исследования и оценки биоповреждений, вызываемых микроорганизмами: Учебно-методическое пособие. Казань: Изд-во Казанского университета, 2014. 36 с.
6. Кряжев Д.В., Смирнов В.Ф., Мочалова А.Е., Смирнова О.Н., Захарова Е.А., Зотов К.А., Смирнова Л.А. Устойчивость композиционных материалов на основе синтетических и природных полимеров к действию микромицетов в природных условиях // *Вестник*

Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 2–2. С. 536–540.

7. Levinskait L. Biodegradation potential of fungi penicillium isolated from synthetic polymeric materials // *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 2018. V. 144. No. 7. P. 51–58.
8. Bankim R. Environmental durability of fibrous polymeric composites // *Eighteenth International Symposium on Processing and Fabrication of Advance Materials [PFAM XVIII]*. Japan, Sendai, 2009. 10 p.
9. Fadeel B., Shvedova A., Kagan V. Interactions of carbon nanotubes with the immune system: focus on mechanisms of internalization and biodegradation // *Nanomedicine – Basic and Clinical Applications in Diagnostics and Therapy*. 2011. No. 2. P. 80–87.
10. Shu X.-L., Shi Q.-S., Feng J., Ouyang Y.-S., Chen Y.-B. Progress in research of microbiological deterioration of polymeric materials // *Corrosion and Protection*. 2008. No. 29. P. 499–502.
11. Kawai F. The biochemistry and molecular biology of xenobiotic polymer degradation by microorganisms // *Bioscience. Biotechnology. Biochemistry*. 2010. No. 74 (9). P. 1743–1759.
12. Zheng Y., Yanful E.K., Bassi A.S. A Review of plastic waste biodegradation // *Critical reviews in biotechnology*. 2005. No. 25 (4). P. 243–250.
13. Gu Ji. D., Lu C., Mitchell R., Thorp K., Crasto A. Fungal degradation of fiber-reinforced composites materials // *Materials performance*. 1997. No. 36. P. 37–42.
14. Gu Ji.D. Microbial deterioration and degradation of synthetic polymer materials: recent research advances // *International biodeterioration and biodegradation*. 2003. No. 52. P. 69–91.
15. ГОСТ 9.049-91. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов.
16. *Plastics – Evaluation of the action of microorganisms: ISO 846:1997*. Berlin: ISO/TC61/SC 6 Ageing, chemical and environmental resistance, 1998. 22 p.
17. Белик Е.С., Рудакова Л.В. Оценка эффективности деструкции биоразлагаемых полимерных материалов // *Градостроительная и отраслевая экология*. 2012. Т. 1. № 5. С. 78–88.
18. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Казначеев С.Н., Смирнов В.Ф. Влияние эксплуатационной среды на биостойкость строительных композитов // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 7. С. 23–31.
19. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордовского государственного ун-та, 2001. 195 с.
20. Полякова Е.А., Высоковский А.С., Коротнева И.С. Биодegradуемый композиционный материал на основе природных и синтетических полимеров // VII Конкурс проектов молодых учёных: тезисы докладов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. С. 32.

## References

1. PK «InPolimer» [Internet resource] <http://www.inpolimer.ru/news/217/dolya-rossii-v-mirovom-rynke-kompozitov-sostavit-1/> (Accessed: 20.06.2018).
2. Mazumdar S., Karthikeyan D., Pichler D., Benevento M., Frassine R. State of the composites industry report for 2017 // *Composites Manufacturing*. 2017. January 2. [Internet resource] <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/01/composites-industry-report-2017/4/> (Accessed: 20.06.2018).
3. Iwańczuk A., Kozłowski M., Łukaszewicz M., Jabłoński S. Anaerobic Biodegradation of polymer composites filled with natural fibers // *Journal of Polymers and the Environment*. June 2015. V. 23. No. 2. P. 277–282.
4. Bankim C.R., Rajesh K.P, Dinesh K.R. Fibrous polymeric composites: environmental degradation and damage. Boca Raton, CRC Press, 2018. 222 p.
5. Karamova N.S., Nadeeva G.V., Bagaeva T.V. Methods of research and evaluation of biological damage caused by microorganism: Educational and methodical manual. Kazan': Izd-vo Kazanskogo universiteta, 2014. 36 p. (in Russian).
6. Kryazhev D.V., Smirnov V.F., Mochalova A.E., Smirnova O.N., Zakharova E.A., Zotov K.A., Smirnova L.A. Stability of synthetic and natural polymer composite materials to the action of micromycetes under natural conditions // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2010. No. 2–2. P. 536–540. (in Russian).
7. Levinskait L. Biodegradation potential of fungi penicillium isolated from synthetic polymeric materials // *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 2018. V. 144. No. 7. P. 51–58.
8. Bankim R. Environmental durability of fibrous polymeric composites // *Eighteenth International Symposium on Processing and Fabrication of Advance Materials [PFAM XVIII]*. Japan, Sendai, 2009. 10 p.
9. Fadeel B., Shvedova A., Kagan V. Interactions of carbon nanotubes with the immune system: focus on mechanisms of internalization and biodegradation // *Nanomedicine – Basic and Clinical Applications in Diagnostics and Therapy*. 2011. No. 2. P. 80–87.
10. Shu X.-L., Shi Q.-S., Feng J., Ouyang Y.-S., Chen Y.-B. Progress in research of microbiological deterioration of polymeric materials // *Corrosion and Protection*. 2008. No. 29. P. 499–502.
11. Kawai F. The biochemistry and molecular biology of xenobiotic polymer degradation by microorganisms // *Bioscience. Biotechnology. Biochemistry*. 2010. No. 74 (9). P. 1743–1759.
12. Zheng Y., Yanful E.K., Bassi A.S. A Review of Plastic Waste Biodegradation // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2005. No. 25 (4). P. 243–250.
13. Gu Ji.D., Lu C., Mitchell R., Thorp K., Crasto A. Fungal degradation of fiber-reinforced composites materials // *Materials performance*. 1997. No. 36. P. 37–42.
14. Gu Ji.D. Microbial deterioration and degradation of synthetic polymer materials: recent research advances // *International biodeterioration and biodegradation*. 2003. No. 52. P. 69–91.
15. GOST 9.049-91. Unified system of corrosion and ageing protection. Polymer materials and their components. Methods of laboratory tests for mould resistance (in Russian).
16. Plastics – Evaluation of the action of microorganisms. (1998). ISO 846:1997. Berlin: ISO/TC61/SC 6 Ageing, chemical and environmental resistance. 22 p.
17. Belik E.S., Rudakova L.V. Investigation of destruction biodegradable polymeric materials // *Gradostroitelnaya i otraslevaya ekologiya*. 2012. V. 1. No. 5. P. 78–88 (in Russian).
18. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Kaznacheev S.N., Smirnov V.F. The influence of the operating environment on the biostability of building composites // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2012. No. 7. P. 23–31 (in Russian).
21. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biological resistance of materials. Saransk: Izd-vo Mordovskogo gos. un-ta, 2001. 195 p. (in Russian).
22. Polyakova E.A., Vysokovskiy A.S., Korotneva I.S. Biodegradable composite material based on natural and synthetic polymers // *VII Konkurs proektov molodykh uchenykh: tezisy dokladov*. Moskva: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2013. P. 32 (in Russian).