

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение

УДК 678.026.3+678:691

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-1-14

Формирование пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях в условиях Севера

А.К. Кычкин*, Н.Ф. Стручков, Г.Г. Винокуров

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

**kychkinplasma@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время базальтопластиковые композиционные материалы находят широкое применение в различных областях промышленности. Как показывает практика, при эксплуатации изделий из базальтопластиковых композиционных материалов на их надежность и долговечность значительное влияние оказывают природно-климатические условия внешней среды. Проблема обеспечения высоких служебных свойств базальтопластиковых композиционных материалов особенно четко проявляется при эксплуатации изделий в районах с экстремальными климатическими условиями. Этим определяется актуальность проведения натурных климатических испытаний базальтопластиковых композиционных материалов в природно-климатических условиях Севера и Арктики.

В работе методом гидростатического взвешивания исследовано формирование пористости при климатических испытаниях базальтопластиковых композиционных материалов. Показано, что при климатической деградации композиционного материала в условиях Севера происходит значительное увеличение его открытой пористости. На основе теории марковских цепей разработана статистическая модель формирования пористости при климатических испытаниях базальтопластиковых композиционных материалов с цилиндрической и плоской симметрией. Проведены расчеты пористости слоев базальтопластикового композиционного материала при равномерной деградации с наружной поверхности. С ростом количества испытаний пористость распространяется на внутренние слои. При большой длительности испытаний распределение пористости слоев приближается к предельному линейному или равномерному законам в зависимости от формы базальтопластикового композиционного материала.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Вилуйско-Мархинский дайковый пояс, дайки, долериты, высокотитанистые базиты.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-05012 и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Тема № 0297-2021-0041).

Введение

С развитием современных технологий базальтопластиковые композиционные материалы находят широкое применение во многих отраслях промышленности – авиастроении, судостроении, в дорожном хозяйстве и др. [1–3]. На эксплуатационные свойства изделий из базальтопластиковых композиционных материалов существенное

влияние оказывают природно-климатические условия внешней среды. Воздействия внешней среды способствуют преждевременному старению базальтопластиковых композиционных материалов. За длительный период эксплуатации изделий (~25–30 лет и более) внешние воздействия могут значительно снизить прочностные свойства материалов. Так, снижение прочности

композиционных материалов, в том числе вследствие пластификации влагой связующего, может достичь ~30 % и более, а температура стеклования связующих может снизиться до ~25 °С. Проблема обеспечения высоких служебных свойств базальтопластиковых композиционных материалов становится особенно актуальной при эксплуатации изделий в районах с экстремальными климатическими условиями Севера и Арктики [3].

Деградация базальтопластиковых композиционных материалов зависит от многочисленных случайных факторов: технологии их изготовления, состава, структуры и свойств материалов, физико-химического взаимодействия компонентов и др. Также при климатических испытаниях базальтопластиковых композиционных материалов непосредственное влияние оказывают случайные факторы внешней среды – сезонный температурный режим и влажность, ветровая нагрузка, солнечная радиация и др.

Поэтому для описания деградации базальтопластиковых композиционных материалов при внешних климатических воздействиях целесообразно использование методов статистического моделирования. Среди методов статистического описания процессов деградации материалов особый интерес представляют исследования на основе применения теории случайных марковских процессов. Дело в том, что марковские процессы – без последствия и занимают промежуточное положение между процессами с последствием (например, ползучесть материалов) и независимыми испытаниями Бернулли [4, 5]. Как известно, математический аппарат теории марковских процессов подробно разработан и имеет обширные приложения в статистической физике и кинетике, химической физике, радиофизике и др. [4–7].

Целью данной работы является установление изменения пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях и разработка статистической модели формирования пористости при деградации композиционных материалов.

Материалы и методика экспериментальных исследований

В работе проведен анализ технологических данных базальтопластиковых композиционных материалов строительной арматуры цилиндрической формы, плоских защитных конструктивных базальтопластиковых композиционных ма-

териалов, а также экспериментальных результатов их климатических испытаний на полигоне в условиях Севера (рис. 1).

Объектами для климатических испытаний и экспериментальных исследований в работе являются базальтосодержащие протяженные цилиндрические композиционные материалы конструкционного назначения – базальтопластиковая арматура с диаметрами 6 и 8 мм (см. рис. 1, а). Композиционные материалы представляют собой эпоксидную матрицу, продольно армированную базальтовыми ровингами; получены вытяжкой на технологической линии «Струна» (г. Бийск, ООО «Бийский завод стеклопластиков»). Далее образцы базальтопластиковой арматуры были подвергнуты климатическим испытаниям экспонированием в течение 51 месяца на открытом полигоне Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН в природно-климатических условиях г. Якутск (см. рис. 1, в).

Плоский базальтопластиковый композиционный материал представляет собой лист базальтотекстолита толщиной 5 мм, состоит из 15 слоев базальтовой ткани БТ-11П-кв-12 и двух слоев (первый и последний) ткани ТБК-100П-кв-12. Плетение саржевого типа; содержание эпоксидного связующего в отвержденном образце составляет $20 \pm 0,5$ % от массы базальтотекстолита (см. рис. 1, б).

Для сравнительного анализа также исследован плоский композиционный материал в виде листа стеклотекстолита толщиной 5 мм, состоящий из стеклоткани Ортекс 560 – 13 слоев; с плотняным плетением (см. рис. 1, б). Содержание эпоксидного связующего в отвержденном образце составляет $13 \pm 0,5$ % от массы стеклотекстолита. Схема переплетения – плотняного (слева) и саржевого типов (справа).

В работе анализ структуры композиционных материалов проведен на микроскопах «Neophot-32», «Stemi2000-C» и «Axio Observer D1m».

Для определения открытой пористости использовался метод гидростатического взвешивания, который широко используется в материаловедении [8, 9]. В качестве пропитывающей жидкости был использован керосин; взвешивание осуществлялось на электронных весах с точностью 0,0001 г. Определение открытой пористости образцов базальтопластиковых композиционных материалов состоит из следующих операций:

1. Изготовление и подготовка образцов.
2. Измерение массы образца в сухом состоянии.

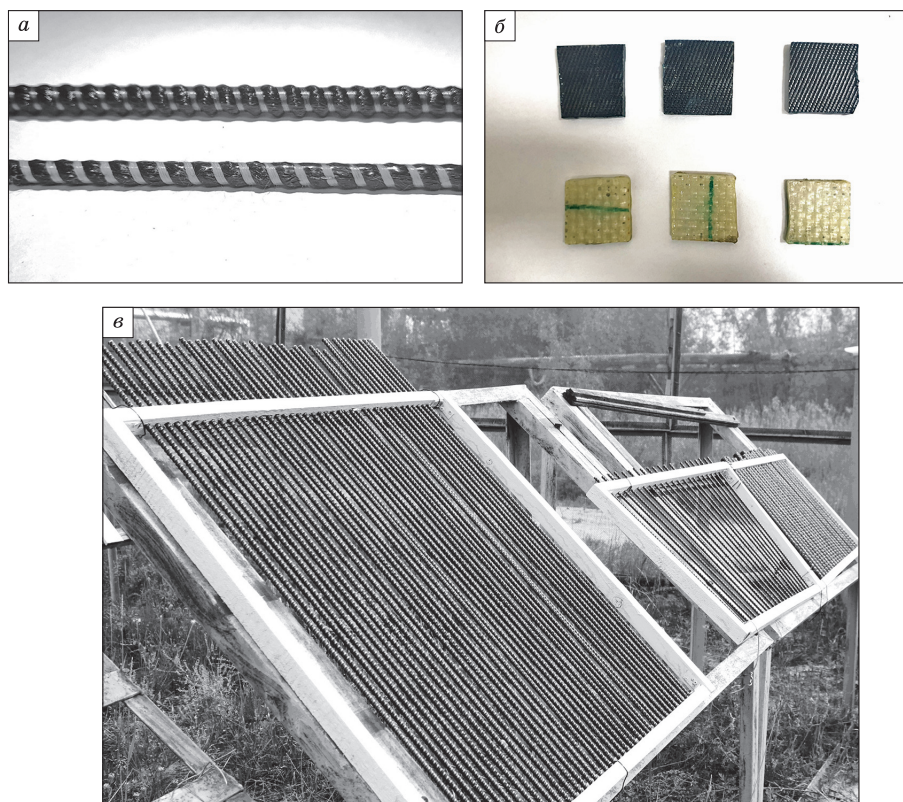


Рис.1. Базальтопластиковые композиционные материалы:

a – цилиндрической формы; *б* – плоской формы; *в* – климатические испытания на открытом полигоне.

Fig. 1. Basalt-plastic composite materials:

a – cylindrical; *б* – flat shape; *в* – climatic tests at an open range.

3. Пропитка образца в керосине в течение 1 сут.
4. Взвешивание пропитанного образца на воздухе.
5. Взвешивание пропитанного образца в керосине.

Далее, по ГОСТ 9.304-87 [9] рассчитывается значение открытой пористости образца базальтопластикового композиционного материала.

Изменение пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях

Регулярными наблюдениями во время климатических испытаний была установлена деградация базальтопластиковых композиционных материалов с формированием дефектов и элементов пористости. Установлено, что деградация происходит, в основном, на границах раздела армирующий материал–матрица. Это означает, что при климатических испытаниях базальтопластиковый композиционный материал будет иметь слоистую структуру. Данная дискретная особенность структуры базальтопластикового композиционного ма-

териала учитывается при разработке статистической модели формирования пористости на основе теории дискретных марковских цепей.

Количественной характеристикой деградации композиционного материала целесообразно рассматривать открытую пористость, которая измеряется сравнительно простыми методами. Поэтому проведено исследование изменения открытой пористости в базальтопластиковых композиционных материалах под воздействием условий внешней среды при климатических испытаниях.

Сначала для определения влияния условий экспонирования измерены данные открытой пористости образцов в зависимости от их расположения. На рис. 2 приведены значения открытой пористости образцов-цилиндров, вырезанных по 30 мм из базальтопластиковой арматуры, после климатических испытаний. Как видно из графиков, открытая пористость имеет значительный разброс данных по длине базальтопластикового композиционного материала. Это происходит вследствие различия локальных условий экспонирования для образцов-цилиндров (солнечная

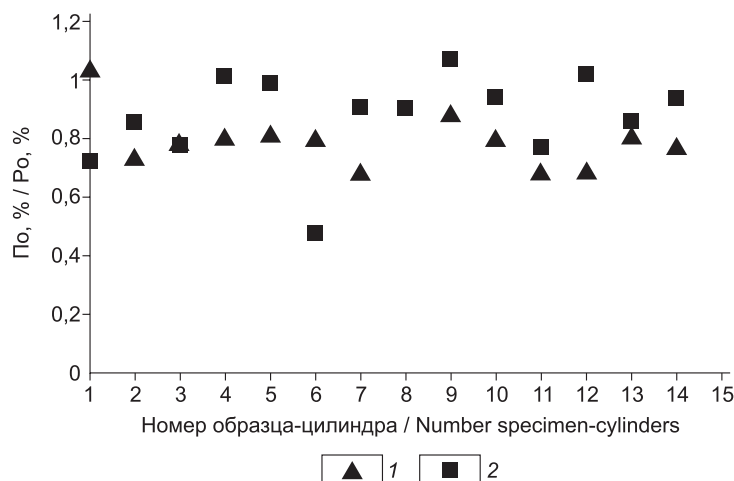


Рис.2. Изменение открытой пористости образцов-цилиндров по длине базальтопластикового композиционного материала:

1 – диаметр 6 мм; 2 – диаметр 8 мм (нумерация образцов от торца базальтопластиковой арматуры).

Fig. 2. Change in open porosity of specimen-cylinders along the length of the basalt-plastic composite material:

1 – diameter 6 mm; 2 – diameter 8 mm (numbering of samples from the end of the basalt-plastic reinforcement).

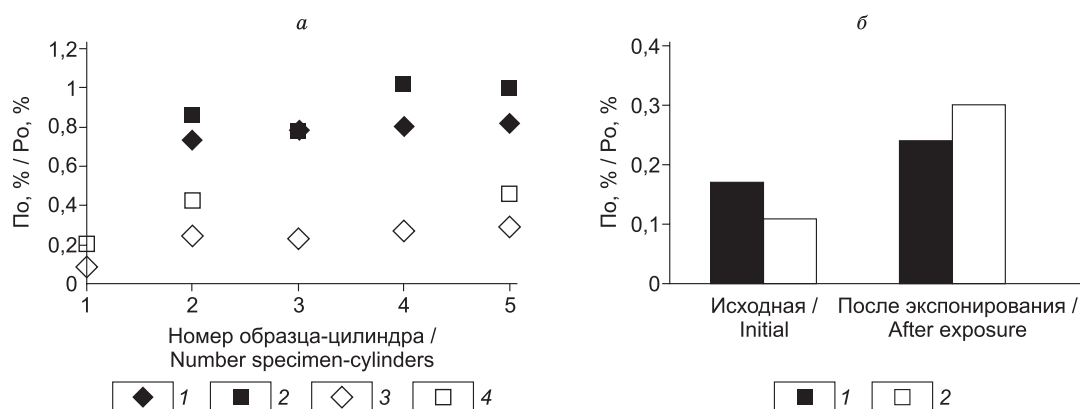


Рис. 3. Изменение открытой пористости образцов при климатических испытаниях композиционного материала:

a – цилиндрическая симметрия (1 – после деградации, диаметр 6 мм; 2 – после деградации, диаметр 8 мм; 3 – исходный материал, диаметр 6 мм; 4 – исходный материал, диаметр 8 мм); *б* – плоская симметрия (1 – базальтопластиковый композиционный материал, 2 – стеклотекстолитовый композиционный материал).

Fig. 3. Change in open porosity of specimens during climatic tests of composite material:

a – cylindrical symmetry (1 – after degradation, diameter 6 mm; 2 – after degradation, diameter 8 mm; 3 – initial material, diameter 6 mm; 4 – source material, diameter 8 mm); *б* – planar symmetry (1 – basalt-plastic composite material, 2 – glass-fiber laminated composite material).

радиация, осадки, ветер и др.). Также наблюдаются в целом более высокие значения открытой пористости для базальтопластиковой арматуры большего диаметра – 8 мм (рис. 2).

Далее исследовано изменение открытой пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях (рис. 3). На рис. 3, *a* приведено изменение открытой пористости образцов базальтопластиковых композиционных материалов цилиндри-

ческой формы при климатических испытаниях (арматура, см. рис. 1, *a*).

Как видно из графиков, при деградации базальтопластикового композиционного материала происходит значительное увеличение его открытой пористости. Наибольшее увеличение пористости наблюдается для базальтопластиковой арматуры диаметра 6 мм – от ~3 до 10 раз. Для базальтопластиковой арматуры диаметром 8 мм также установлено существенное увеличение

открытой пористости образцов от ~ 2 до 3 раз (см. рис. 3, а).

На рис. 3, б представлено изменение открытой пористости образцов при климатических испытаниях базальтопластиковых и стеклотекстолитовых композиционных материалов плоской формы (см. рис. 1, б). Также наблюдается значительное увеличение их открытой пористости при климатической деградации. Средние значения открытой пористости исходных образцов базальтопластиковых и стеклотекстолитовых композиционных материалов равны 0,17 и 0,11 % соответственно (см. рис. 3, б). Как видно из экспериментальных данных (рис. 3, б), после экспонирования открытая пористость у базальтопластиковых композиционных материалов увеличивается до $\sim 0,24$ % (в 1,4 раза); у стеклотекстолитовых материалов открытая пористость возрастает до $\sim 0,30$ % (в 2,7 раза).

Таким образом, величина открытой пористости может рассматриваться в качестве чувствительной количественной характеристики деградации базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях.

Модель марковских цепей для описания формирования пористости при климатических испытаниях базальтопластиковых композиционных материалов

Для статистического моделирования на основе дискретной марковской цепи рассмотрены два вида слоистой структуры базальтопластиковых композиционных материалов – цилиндрической (см. рис. 1, а) и плоской (см. рис. 1, б) форм.

Цилиндрический базальтопластиковый композиционный материал представляется бесконечным цилиндром с одинаковыми продольными армирующими ровингами. Тогда поперечное сечение цилиндра можно разбить на концентрические слои, толщину слоев выбираем больше диаметра армирующих ровингов; нумерация слоев задается начиная с поверхности бесконечного цилиндра 1, 2, 3, ..., N .

Плоский базальтопластиковый композиционный материал представляется бесконечной областью с одинаковыми плоскими текстильными материалами между двумя граничными плоскостями. Тогда поперечное сечение можно разбить на плоские слои одинаковой толщины, которая выбирается намного большей толщины армирующих материалов. Деградация плоского базаль-

топластикового материала происходит одновременно с обеих граничных плоскостей. Поэтому задается нумерация слоев половины материала, также начиная с поверхности граничной плоскости до середины образца 1, 2, 3 ..., N .

Статистический подход на основе марковских цепей разработан с учетом данных слоистых схем структуры базальтопластиковых композиционных материалов. Дело в том, что при таком подходе с учетом цилиндрической или плоской симметрии композиционного материала номер слоя является единственной переменной. Таким образом, объектом статистического моделирования становится распределение пористости слоев композиционного материала.

Для разработки статистической модели формирования пористости при деградации композиционного материала приняты следующие допущения:

1. Образование локальной пористости базальтопластикового композиционного материала происходит на границе матрица–армирующий материал.

Вследствие деградации композиционного материала при климатических испытаниях физико-механические свойства матрицы и армирующего материала изменяются со временем. В итоге их разница приводит к возникновению дефектов и пористости на их границе.

2. Изменение пористости по слоям базальтопластикового композиционного материала описывается простой марковской цепью.

Слоистая схема описания базальтопластиковых композиционных материалов является дискретной и конечной (диаметр цилиндра и толщина пластины ограничены); таким образом, задаются конечные N -мерные векторы распределения пористости. Для предлагаемой марковской цепи событием является появление пористости в цилиндрическом или плоском слое. Пусть номера слоев $n = 1, 2, \dots, N$, тогда количество слоев N задает число строк матрицы переходных вероятностей марковской цепи. Обозначим $Π_0$ дискретную случайную величину пористости цилиндрических или плоских слоев; начальное распределение пористости задается N -мерным вектором-строкой $F_0(Π_0)$ с условием нормировки элементов:

$$\sum_{n=1}^N F_{0n}(Π_0) = 1. \quad (1)$$

При полной деградации композиционного материала пористость на границах матрица–армирующий материал появляется по всему поперечному сечению. Тогда распределение пористости по слоям задается линейно убывающим (цилиндрическая геометрия материала) или постоянным (плоская геометрия материала) предельными законами распределения $F_{\text{пр}}(Po)$. Также задается целочисленное количество испытаний марковской цепи l – количество дней, недель, месяцев, год и др., которые соответствуют единице измерения длительности климатических испытаний.

Для простых однородных цепей Маркова матрицы переходных вероятностей можно задать табл. 1 (цилиндрическая геометрия материала) и табл. 2 (плоская геометрия материала); где p, q –

вероятности переходов. Распределение пористости через l испытаний задается произведением вектора на l степень матрицы [4]:

$$F(Po) = F_0(Po) A^l, \quad (2)$$

где A – матрица переходных вероятностей.

Следует отметить, что для первой строки первой матрицы переходных вероятностей (табл. 1) выполнение условия нормировки (1) обеспечивается быстрой сходимостью убывающего степенного ряда при $0 \leq p < 1$. Также данный вид матрицы переходных вероятностей A выбран для обеспечения предельного линейно убывающего распределения $F_{\text{пр}}(Po)$ пористости цилиндрических слоев.

Вид второй матрицы переходных вероятностей A для плоской геометрии (табл. 2) также

Таблица 1

**Матрица переходных вероятностей марковской цепи
для цилиндрической симметрии базальтопластиковых композиционных материалов**

Table 1

**Matrix of transition probabilities of the Markov chain
for cylindrical symmetry of basalt-plastic composite materials**

Столбцы Строки	1	2	3	4	...	$N-1$	N
1	$(1-2p)/(1-p)$	p	p^2	p^3	...	p^{N-2}	p^{N-1}
2	q	$1-p-q$	p	0	...	0	0
3	0	q	$1-p-q$	p	...	0	0
4	0	0	q	$1-p-q$	...	0	0
...	...	...	..	...	...	...	...
$N-1$	0	0	0	0	...	$1-p-q$	p
N	0	0	0	0	...	q	$1-q$

Таблица 2

**Матрица переходных вероятностей марковской цепи
для плоской симметрии базальтопластиковых материалов**

Table 2

**Matrix of transition probabilities of the Markov chain
for plane symmetry of basalt-plastic materials**

Столбцы Строки	1	2	3	4	...	$N-1$	N
1	q	$1-q$	0	0	...	0	0
2	q	$1-p-q$	p	0	...	0	0
3	0	q	$1-p-q$	p	...	0	0
4	0	0	q	$1-p-q$	...	0	0
...	...	...	..	...	...	...	...
$N-1$	0	0	0	0	...	$1-p-q$	p
N	0	0	0	0	...	q	$1-q$

выбран для обеспечения предельного равномерного распределения $F_{\text{пр}}(Po)$ пористости плоских слоев.

Из формулы (2) следует, что вычисления сводятся только к алгебраическим операциям умножения матриц. В работе расчеты распределения пористости проведены с использованием MathCad. Расчеты проведены при различных вероятностях перехода $0 \leq p \leq 1$, $0 \leq q \leq 1$ и размерах матрицы переходных вероятностей до 100×100 (до ста слоев композиционного материала); расчет степеней матрицы проведен от 10 до 10000.

При климатических испытаниях деградация базальтопластикового композиционного материала начинается с поверхности. Поэтому начальное распределение следует задавать вектором $F_0(Po) = (1, 0, 0, 0 \dots 0)$ – вначале появляется пористость только для наружного слоя.

На рис. 4 приведены результаты расчетов распределения пористости цилиндрических (а) и плоских (б) слоев базальтопластикового композиционного материала в зависимости от длительности испытаний l . Как видно из графиков, с возрастанием длительности испытаний l распределения пористости более выравниваются.

Для цилиндрической симметрии базальтопластикового материала при $l = 1000$ распределение

приближается к линейно убывающему предельному распределению $F_{\text{пр}}(Po)$ (см. рис. 4, а, кривая 3). Линия 4 соответствует $F_{\text{пр}}(Po)$ при полной деградации композиционного материала, когда пористость появляется по всему объему бесконечного цилиндра.

Для плоской симметрии базальтопластикового материала (см. рис. 4, б) при возрастании длительности испытаний распределения приближаются к постоянному предельному распределению, пористость начинает появляться по всему плоскому образцу (линии 3, 4). Линия 4 также соответствует предельному постоянному закону распределения $F_{\text{пр}}(Po)$ при полной деградации плоского композиционного материала.

Экспериментальными исследованиями была обнаружена исходная пористость для всех видов базальтопластиковых композиционных материалов до экспозиции климатических испытаний. Поэтому для расчета абсолютных значений пористости необходимо задавать пористость деградированного внешнего слоя $l_{\text{исх}}$ из экспериментальных данных. Тогда изменения пористости слоев базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях можно рассчитать по пропорции с законами распределения (см. рис. 4).

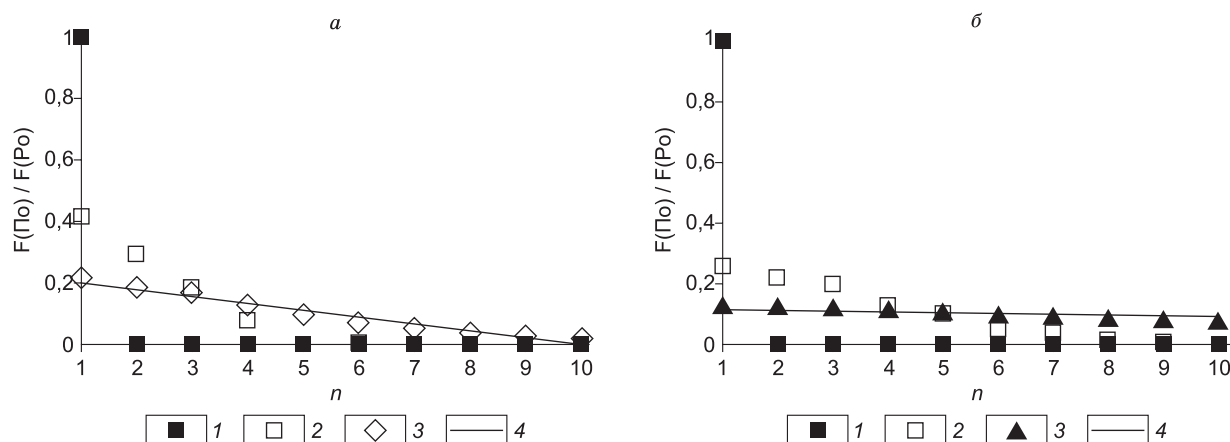


Рис. 4. Распределения пористости цилиндрических (а) и плоских (б) слоев базальтопластикового композиционного материала в зависимости от длительности испытаний:

а: 1 – начальное распределение $l = 0$, 2 – $l = 10$, 3 – $l = 1000$, 4 – предельное распределение $F_{\text{пр}}(Po)$; вероятности переходов $p = 0,148$, $q = 0,2$; количество цилиндрических слоев $N = 10$; матрица 10×10 ; б: 1 – начальное распределение $l = 0$, 2 – $l = 10$, 3 – $l = 100$, 4 – $l = 1000$, предельное распределение $F_{\text{пр}}(Po)$; вероятности переходов $p = 0,5$, $q = 0,5$; количество плоских слоев $2N = 20$; матрица 10×10 .

Fig. 4. Porosity distributions of cylindrical (а) and flat (б) layers of basalt-plastic composite material, depending on the duration of tests:

а: 1 – initial distribution $l = 0$, 2 – $l = 10$, 3 – $l = 1000$, 4 – limiting distribution $F_{\text{пр}}(Po)$; transition probabilities $p = 0,148$, $q = 0,2$; the number of cylindrical layers $N = 10$; matrix 10×10 ; б: 1 – initial distribution $l = 0$, 2 – $l = 10$, 3 – $l = 100$, 4 – $l = 1000$, limiting distribution $F_{\text{пр}}(Po)$; transition probabilities $p = 0,5$, $q = 0,5$; the number of flat layers $2N = 20$; matrix 10×10 .

Заключение

1. Проведено изучение изменения пористости при климатических испытаниях базальтопластиковых композиционных материалов. Выявлено, что при климатической деградации композиционного материала происходит существенное увеличение его открытой пористости: для базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм – от ~3 до 10 раз, для арматуры диаметра 8 мм – от ~2 до 3 раз. Для плоских базальтопластиковых композиционных материалов открытая пористость увеличивается до ~1,4 раза.

2. На основе теории марковских цепей предложена статистическая модель формирования пористости при климатических испытаниях базальтопластиковых композиционных материалов. При этом испытание для марковской цепи является единицей времени климатических испытаний. Для построения модели рассмотрены слоистые структуры базальтопластиковых композиционных материалов цилиндрической и плоской геометрии. Соответственно построены две матрицы переходных вероятностей для простых однородных цепей Маркова, которые описывают равномерную климатическую деградацию с поверхности базальтопластикового композиционного материала.

3. При полной деградации композиционного материала цилиндрической геометрии пористость распределяется равномерно по всему поперечному сечению и задается линейно убывающим законом распределения. Для базальтопластикового композиционного материала плоской фор-

мы предельное распределение описывается постоянным законом распределения.

Литература

1. Вапиров Ю.М., Кириллов В.П., Кривонос В.В. Закономерности изменения свойств полимерных композитоконструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях // Сб. докл. VI научной конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2006». М., 2006. Ч. II. С. 103–108.
2. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композиционных материалов при термовлажностном старении // Докл. РАН. 2009. Т. 428, № 1. С. 56–60.
3. Ефимов В.А., Шведова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях // Труды ВИАМ. 2013. № 1. (электронный журнал).
4. Рытов С.В. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1966. 404 с.
5. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 489 с.
6. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 528 с.
7. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М.: Наука, 1984. 374 с.
8. Исакаев Э.Х., Мордынский В.Б., Подымова Н.Б., Сидорова Е.В., Школьников Е.И. Определение пористости газотермических покрытий // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 5. С. 71–77.
9. ГОСТ 9.304-87 Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. вед. 01.07.89. М.: Изд-во стандартов, 1988. 10 с.

Поступила в редакцию 20.01.2021

Принята к публикации 18.02.2021

Об авторах

КЫЧКИН Анатолий Константинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1,

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

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская,

<https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, struchkov_n@rambler.ru;

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1,

<https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru.

Информация для цитирования

Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. Формирование пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях в условиях Севера // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 1. С. 145–154. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-14>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-1-14

Formation of the porosity of basalt-plastic composite materials during climate tests under the conditions of the North

A.K. Kychkin, N.F. Struchkov, G.G. Vinokurov

V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

*kychkinplasma@mail.ru

Abstract. Currently, basalt-plastic composite materials are widely used in various branches of industry. As practice shows, during the operation of products made of basalt-plastic composite materials, their reliability and durability are significantly influenced by the natural and climatic conditions of the external environment. The problem of ensuring high service properties of basalt-plastic composite materials is especially clearly manifested during the operation of products in the areas with extreme climatic conditions. This determines the urgency of carrying out full-scale climatic tests of basalt-plastic composite materials under the climatic conditions of the North and the Arctic. In this work, the formation of porosity during climatic tests of basalt-plastic composite materials was investigated by means of hydrostatic weighing. It is shown that during climatic degradation of a composite material in the North, there is a significant increase in its open porosity. On the basis of the theory of Markov chains, a statistical model of the formation of porosity during climatic tests of basalt-plastic composite materials with cylindrical and planar symmetry is developed. Calculations of the porosity of the layers of a basalt-plastic composite material with uniform degradation from the outer surface were carried out. As the number of tests increases, porosity spreads to the inner layers. With a long test duration, the distribution of the porosity of the layers approaches the limiting linear or uniform laws, depending on the shape of the basalt-plastic composite material.

Key words: basalt-plastic composite materials, climatic tests, porosity, statistical modeling, Markov chains.

Acknowledgements. The work was supported by the RFBR under Project No. 18-29-05012 and within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 0297-2021-0041).

References

1. Vapirova Yu.M., Kirillov V.P., Krivonos V.V. Zakonomernosti izmeneniya svoystv polimernykh kompozitokonstruksionnogo naznacheniya pri dlitel'nom klimaticheskom starenii v svobodnom i nagruzhennom sostoyaniyakh // Sb. dokl. VI nauchnoi konf. po gidroaviatsii «Gidroaviasalon–2006». M., 2006. Ch. II. P. 103–108.
2. Startsev O.V., Anikhovskaya L.I., Litvinov A.A., Krotov A.S. Povyshenie dostovernosti prognozirovaniya svoystv polimernykhkompozitsionnykh materialov pri termovlazhnostnom starenii // Dokl. RAN. 2009. Vol. 428, No. 1. P. 56–60.
3. Efimov V.A., Shvedova A.K., Koren'kova T.G., Kirillov V.N. Issledovanie polimernykh konstruksionnykh materialov pri vozdeistvii klimaticheskikh faktorov i nagruzok v laboratornykh i naturnykh usloviyakh // Trudy VIAM. 2013. No. 1. (elektronnyi zhurnal).
4. Rytov S.V. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. M.: Nauka, 1966. 404 p.
5. Tikhonov V.I., Mironov M.A. Markovskie protsessy. M.: Sovetskoe radio, 1977. 489 p.
6. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P. Fizicheskaya kinetika. M.: Nauka, 1979. 528 p.
7. Zel'dovich Ya.B. Izbrannye trudy. Khimicheskaya fizika i gidrodi-namika. M.: Nauka, 1984. 374 p.

8. *Isakaev Eh.Kh., Mordynskii V.B., Podymova N.B., Sidorova E.V., Shkol'nikov E.I.* Opredelenie poristosti gazotermicheskikh pokrytii // *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2010. No. 5. P. 71–77.

9. *GOST 9.304-87 Pokrytiya gazotermicheskie. Obshchie trebovaniya i metody kontrolya*. ved. 01.07.89. M.: Izd-vo standartov, 1988. 10 s.

About the authors

KYCHKIN Anatoly Konstantinovich, Cand. Sci. (Engineering), leading researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, kychkinplasma@mail.ru;

STRUCHKOV Nikolay Fedorovich, Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, struchkov_n@rambler.ru;

VINOKUROV Gennady Georgievich, Cand. Sci. (Engineering), leading researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru.

Citation

Kychkin A.K., Struchkov N.F., Vinokurov G.G. Formation of the porosity of basalt-plastic composite materials during climate tests under the conditions of the North // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021. Vol. 26, No. 1. pp. 145–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-14>