

УДК 51-72:517.977.5:519.873

ПОДХОД ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УТОЧНЕННЫХ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

© 2024 г. Е. Л. Гусев^{1,2,*}, В. Н. Бакулин^{3,**}

Представлено академиком РАН Б. Н. Четверушкиным

Получено 01.08.2024 г.

После доработки 08.10.2024 г.

Принято к публикации 28.10.2024 г.

Предложен подход для построения уточненных обобщенных моделей долговечности композитов в экстремальных условиях на основе современных положений кинетической теории прочности. В рамках вариационных постановок предложены и разработаны эффективные методы прогнозирования определяющих характеристик (остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности) композитов в экстремальных условиях внешней среды. Проведенные исследования позволили разработать методологию согласования определяющих параметров физических моделей на микроуровнях с соответствующими определяющими параметрами математических моделей на макроуровнях, что позволяет решить задачу восстановления параметров физико-химических процессов, происходящих на микроуровнях и приводящих к деструктивным изменениям в композициях и ухудшению их характеристик с течением времени.

Ключевые слова: кинетическая теория прочности, композиционные материалы, вариационная постановка, методы прогнозирования, физические, математические модели, экстремальные факторы, остаточный ресурс, долговечность.

DOI: 10.31857/S2686954324060065, EDN: KKWVV

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия при разработке образцов современной техники, в т.ч. высокоскоростного транспорта, значительное внимание уделяется проблеме создания надежных высокоточных методов количественной оценки работоспособности конструкций из полимерных и композиционных материалов (КМ, ПКМ) [1–7]. Важность разработки эффективных высокоточных методов оценки долговечности КМ, ПКМ в экстремальных условиях внешней среды обуславливается тем, что композиционные материалы и конструкции из них являются неотъемлемой частью современной техники в таких областях, определяющих научно-

технический прогресс, как авиационная и космическая техника, судостроение, нефтяная и газовая промышленность и др. [8–12]. Воздействие экстремальных факторов внешней среды может быть связано с температурными факторами, влажностью, воздействием солнечной и проникающей радиации, механических напряжений и других факторов, как в отдельности, так и в различных сочетаниях.

В настоящее время доминируют КМ, ПКМ, которые обладают способностью без замены функционировать 20–30, а в необходимых случаях и более лет. Для адекватной оценки долговечности КМ, ПКМ, используемых в современных устройствах, возможности высокоточного прогнозирования определяющих характеристик композитов, должны быть разработаны эффективные и надежные соотношения между кинетическими параметрами физико-химических процессов, происходящих на молекулярном уровне и макросвойствами материалов, определяющими их эксплуатационную пригодность. Данные вопросы составляют актуальную научную и важную прикладную проблему, которая стоит на пути создания обосно-

¹Институт проблем нефти и газа Федерального исследовательского Центра “Якутский научный Центр Сибирского Отделения РАН”, г. Якутск, Россия

²Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск, Россия

³Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия

* E-mail: elgusev@mail.ru

** E-mail: vbak@yandex.ru

ванных подходов к прогнозированию изменения свойств КМ, ПКМ при их хранении и эксплуатации.

2. ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Изменение свойств КМ, ПКМ с течением времени отражается на их работоспособности. Окружающая среда, в контакте с которой материал находится в течение длительного времени, характеризуется различным составом, влажностью, температурой, интенсивностью световой и проникающей радиации. Применение КМ, ПКМ в авиа- и космической технике делает еще более актуальным проведение исследований стойкости материалов к излучению [4–7]. При исследовании стойкости материалов к излучению эффективным активатором старения является проникающая радиация. Проникающая радиация в отличие от световой радиации способна инициировать превращения во всем объеме полимера.

3. СТРУКТУРА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА МИКРОУРОВНЕ

Между энергией активации протекающих при старении физических и химических процессов и интенсивностью молекулярных движений была установлена связь, в соответствии с которой энергия активации будет зависеть от температуры и физического состояния полимера. В настоящее время основу молекулярно-кинетической теории (МКТ) составляют две современные теории, которые позволяют объяснить кинетику протекания элементарных химических реакций на молекулярном уровне. Это теория активных столкновений (ТАС) и теория активированных комплексов (ТАК). В рамках ТАС считается, что реакции могут происходить только в моменты столкновения молекул. В ТАК, в отличие от ТАС, для любой элементарной химической реакции предполагается, что переход начальной конфигурации атомов в конечную осуществляется в результате непрерывного изменения межъядерных расстояний. В соответствии с основными положениями МКТ число молекул, обладающих энергией E , большей энергии активации E_a , пропорционально величине $\exp(-E_a/RT)$, где R — постоянная Больцмана, T — температура. При этом скорость химических реакций может быть описана уравнениями Аррениуса, которые в функциональной и дифференциальной формах соответственно имеют вид:

$k = k_0 \exp(-E_a/RT)$, $d(\ln k)/dt = E_a/RT^2$. Частота столкновений реагирующих молекул, характеризуется фактором частоты k_0 , который по физическому смыслу выражает долю частиц, у которых энергия равна или больше энергии активации E_a . В соответствии с основными положениями кинетической теории прочности характер изменения во времени определяющего свойства композита V , будет определяться элементарными химическими реакциями на молекулярном уровне, которые допускают описание суперпозицией уравнений Аррениуса, описывающих различные виды молекулярных взаимодействий, инициированных воздействием различных экстремальных факторов $F_1, F_2, \dots, F_p$ на материал. В соответствии с этим в основу исследований на микроуровне были положены физические модели, в которых характер изменения во времени определяющего свойства композита определяется функциональными зависимостями, представимыми в форме суперпозиции уравнений Аррениуса:

$$V = V_0 + G \left(k_0^1 \exp\left(\frac{E_a^1}{RT}\right), k_0^2 \exp\left(\frac{E_a^2}{RT}\right), \dots, k_0^s \exp\left(\frac{E_a^s}{RT}\right), \dots \right), \quad (1)$$

где G — функциональная зависимость, связывающая определяющую характеристику композита с параметрами физико-химических процессов, происходящих на молекулярном уровне, V_0 — начальное значение определяющей характеристики композита.

4. ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ СОВРЕМЕННОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

При предположениях, что различные физические факторы $F_1, F_2, \dots, F_p$ оказывают на полимерные материалы воздействие, независимое от воздействия других факторов, а также что изменения, вызванные воздействием различных физических факторов на материал суммируются, можно принять, что обобщенная модель долговечности, описывающая одновременное воздействие нескольких факторов на материал может быть представлена в виде:

$$V = V_0 + \sum_{j=1}^p F_j(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}; t). \quad (2)$$

В этих обозначениях V — прогнозируемая определяющая характеристика композита, V_0 — первоначальное значение определяющей характеристики; $u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}$ — параметры, описывающие

характер воздействия j -го фактора на композит, t — время. В соответствии с основными положениями кинетической теории прочности принято, что воздействие каждого из факторов F_j на материал будет активировать на микроуровне совокупность деструктивных элементарных процессов, протекающие химические реакции в которых могут быть описаны в виде суперпозиции уравнений Аррениуса. Каждое из составляющих суперпозицию уравнений Аррениуса будет описывать определенный вид элементарных химических реакций, с присущими ему параметрами — фактором частоты, характеризующим частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема реагирующей смеси), и энергией активации, присущими для данной реакции. В соответствии со сформулированными положениями воздействие каждого физического фактора F_j на материал может быть представлено в виде суперпозиции уравнений Аррениуса:

$$F_j(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}; t) = \sum_{k=1}^{N_j} \alpha_{kj} (u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}) \times [\exp(\beta_{kj} (u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}) t) - 1], \quad (3)$$

$$j = 1, 2, \dots, p; \quad 0 \leq t \leq t_{\max}$$

В этих обозначениях N_j — число элементарных деструктивных процессов, протекание химических реакций в которых активируется при воздействии j -го фактора на материал. Параметры $\alpha_{kj} = \alpha_{kj}(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j})$ выражают долю частиц, у которых энергия больше или равна энергии активации, необходимой для инициирования k -ой элементарной химической реакции ($k = 1, 2, \dots, N_j$) при воздействии на композит фактора F_j ; параметры $\beta_{kj} = \beta_{kj}(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j})$ связаны с энергией активации, т.е. с избытком энергии по отношению к средней энергии частиц при данной температуре, необходимого для того, чтобы реагирующие частицы могли инициировать k -ую элементарную химическую реакцию ($k = 1, 2, \dots, N_j$) при воздействии на композит фактора F_j . Избыток энергии, связанный с энергией активации, определяется свойствами реагирующих частиц, их энергетическим состоянием.

5. ВАРИАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

На основе кратковременных испытаний, проведенных на временном интервале ретроспекции $[0, t_{\min}]$, необходимо найти оптимальные параметры $u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*$ обобщенной модели прогнозирования $V(u^*; t)$, которые доставляют глобальный

минимум критерию эффективности (4) на множестве многопараметрических обобщенных моделей долговечности $V\{u; t\}$, позволяющих осуществлять прогноз с погрешностью, не превышающей заранее заданную предельно допустимую точность прогноза $\gamma_{\max}$:

$$J(u_1, u_2, \dots, u_n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [V(u_1, u_2, \dots, u_n; t) - \tilde{V}_i]^2 \Rightarrow \min_{u \in U}, \quad \|V(\cdot) - V^*(\cdot)\|_C \leq \gamma_{\max}. \quad (4)$$

В этих обозначениях: $\tilde{V}_i$, ($i = 1, 2, \dots, m$) — измеренные значения определяющей характеристики V в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$; $V^*(t)$ — реальная временная зависимость определяющей характеристики; U — допустимое множество параметров обобщенной модели долговечности:

$$\|V(\cdot) - V^*(\cdot)\|_C = \max_{t_{\min} \leq t \leq t_{\max}} |V(t) - V^*(t)|. \quad (5)$$

(Нижний индекс “C” в формуле (5) обозначает норму в метрическом пространстве непрерывных функций.)

Вектор неопределенных параметров $u^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$ доставляет глобальный минимум функционалу ошибки (4):

$$u^* = \arg \min_{u \in U} J(u). \quad (6)$$

(Обозначение $\arg \min_{u \in U}$ в формуле (6) означает что значение переменной u^* доставляет глобальный минимум функционалу J).

6. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИКИ СОГЛАСОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА МИКРО- И МАКРОУРОВНЕ

При решении вопроса об оптимальном согласовании определяющих параметров физических моделей, описывающих молекулярные взаимодействия на микроуровне с определяющими параметрами математических моделей, учитывающих результаты экспериментальных измерений на макроуровне, в соответствии с молекулярно-кинетической теорией [13–15], было принято, что основное влияние на изменение во времени остаточного ресурса композитов оказывают деструктивные процессы, происходящие на микроуровне, которые активируются воздействующими на композит экстремальными факторами внешней среды. Существенное влияние деструктивных процессов на ухудшение определяющих характеристик полимерных композитов следует из теории скоростей реакций, связывающей процессы превращений,

химических и электрохимических реакций в материалах, с учением о строении веществ [1, 13–15].

Поэтому в основу разрабатываемого подхода к решению проблемы прогнозирования определяющих характеристик композитов в рамках вариационных постановок положены основные выводы и положения теории скоростей реакций, охватывающей процессы превращений, химических и электрохимических реакций в материалах, которые в рамках данной теории, связываются с учением о строении веществ [1, 13–15]. Также разрабатываемый подход основывается на экспериментальных работах по установлению зависимостей между временем разрушения, скоростью ползучести и условиями нагружения, которыми подтверждаются основные положения и выводы теории скоростей реакций [1, 13–16, 16, 17]. В соответствии с этим выявленные закономерности дают основание трактовать разрушение как кинетический процесс [5, 14, 15]. Но для понимания наблюдаемых зависимостей требуется установить связь между макроскопическими свойствами материала и элементарными атомными процессами.

В рамках молекулярно-кинетической теории принято, что процессы химических реакций, происходящие в материалах на молекулярном уровне, могут быть описаны системой соотношений Аррениуса [1, 5, 13–15]. В соответствии с этим было принято, что структура моделей долговечности на макроуровне должна соответствовать структуре физических моделей, описывающих процессы, происходящие на микроуровне. Поскольку многофакторные деструктивные процессы, происходящие на микроуровне, могут быть описаны физическими моделями, представимыми в виде суперпозиции уравнений Аррениуса, то для адекватного описания временной зависимости остаточного ресурса полимерных композитов на макроуровне, структура обобщенных функций долговечности, была принята аналогичной структуре физических моделей, описывающих деструктивные процессы, происходящие на микроуровне. Эта система предположений достаточно хорошо согласуется с результатами проведенных исследований, когда в качестве простых функций долговечности рассматривались экспоненциальные зависимости, имеющие небольшое число неопределенных параметров [1, 16, 17]. В соответствии с этим структура обобщенных функций долговечности, описывающих на макроуровне изменение во времени определяющего свойств композита, также была принята в виде суперпозиции экспоненциальных функций с неопределенными параметрами. В рамках сформулированных вариационных постановок система неопределенных параметров подбирается из условия, чтобы основные качественные закономерности

структуры временной зависимости обобщенных функций долговечности, построенных на основе результатов физических экспериментов, проведенных на интервале ретроспекции, в максимальной степени соответствовали, основным качественным закономерностям структуры реальной временной зависимости остаточного ресурса на данном временном интервале. При этом следует ожидать, что и основные качественные закономерности структуры временной зависимости обобщенной функции долговечности, построенной по такой схеме, будут соответствовать основным качественным закономерностям реальной временной зависимости остаточного ресурса и на прогнозируемом временном интервале.

Был введен ряд основополагающих принципов и понятий (принцип множественности моделей прогнозирования, модели прогнозирования оптимальной структуры и сложности, предельно-допустимая точность прогноза), которые позволили провести оптимальное согласование определяющих параметров математических моделей на макроуровне, с определяющими параметрами физических моделей, описывающими молекулярные взаимодействия на микроуровне. Разработана методика построения моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности [18–24], которая позволила существенно уточнить результаты в области прогнозирования долговечности, прочности, остаточного ресурса КМ и конструкций из них, и по новому представить явления и многофакторные деструктивные процессы, происходящие на молекулярном уровне.

В рамках сформулированных вариационных постановок исследуется параметрическое семейство обобщенных моделей долговечности $\{V^N(; t)\}$, $(1 \leq N < \infty)$, в котором параметром является число слагаемых в разложении функции долговечности в ряд. Обобщенная модель долговечности, соответствующая параметру N параметрического семейства имеет вид:

$$V^N(; t) = V_0 + \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^N \alpha_{kj} (u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}) \times \times [\exp(\beta_{kj} (u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}) t) - 1]. \quad (7)$$

В рамках введенного многопараметрического семейства обобщенных моделей долговечности $\{V^N\}_{N=1}^{\infty}$ строится модель прогнозирования оптимальной структуры и сложности, параметры которой подбираются из условия, чтобы временные качественные закономерности модели на временном отрезке ретроспекции в максимальной степени соответствовали бы временным качественным закономерностям реальной временной зависимости остаточного ресурса $V^*(t)$ [18–24].

В соответствии со сформулированным принципом множественности моделей прогнозирования, введенным понятием моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности и методологией их построения, следует ожидать, что в этом случае данные качественные закономерности на отрезке прогнозирования $[t_{\min}, t_{\max}]$ будут в максимальной степени соответствовать и качественным закономерностям реальной временной зависимости остаточного ресурса $V^*(t)$. В вариационной постановке сформулированная проблема построения модели оптимальной структуры и сложности может быть сведена к решению следующей экстремальной задачи:

$$\begin{aligned} & \left\| V^{N^*} \left((u^{N^*})^* ; t \right) - V^*(t) \right\| = \\ & = \min_{1 \leq N < \infty} \left\| V^{N^*} \left((u^N)^* ; t \right) - V^*(t) \right\|_C, \quad (8) \\ & \|V(t) - V^*(t)\|_C < \gamma_{\max}, \quad 1 < N < \infty. \end{aligned}$$

Здесь N^* — оптимальное число параметров модели прогнозирования оптимальной структуры и сложности V^{N^*} ; $(u^{N^*})^*$ — оптимальный вектор параметров оптимальной модели прогнозирования параметрического семейства, соответствующей параметру N ; $\gamma_{\max}$ — предельно-допустимая ошибка решения задачи прогноза. В соответствии с принципом множественности моделей прогнозирования, считается, что если в заданном многопараметрическом семействе обобщенных моделей прогнозирования существует модель наиболее адекватная реальной прогнозируемой временной зависимости

$V^*(t)$, то данная модель является моделью оптимальной структуры и сложности.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ

Проведено исследование возможности применения оптимальных обобщенных моделей долговечности для выявления определяющих факторов, оказывающих существенное влияние на устойчивость оценки точности прогноза на прогнозируемом временном интервале $[t_{\min}, t_{\max}]$. Рассматривалось параметрическое семейство задач прогнозирования $V_{\tau}^*(t) = V(u_{\tau}^*; t)$, в котором параметром является текущий размер интервала ретроспекции τ ($0 \leq \tau \leq t_{\max}$, $0 \leq t \leq t_{\max}$). Здесь u_{τ}^* — оптимальный вектор неопределенных параметров, определяющий модель долговечности оптимальной структуры и сложности $V_{\tau}^*(t)$, которая соответствует τ . Качественный анализ позволил установить важные закономерности структуры моделей долговечности оптимальной структуры и сложности при изменении размеров интервала ретроспекции τ . Установлено существование на интервале ретроспекции областей устойчивости, неустойчивости, а также повышенной точности прогноза. На рис. 1 на основе разработанной методологии приведены результаты вычислительных экспериментов по прогнози-

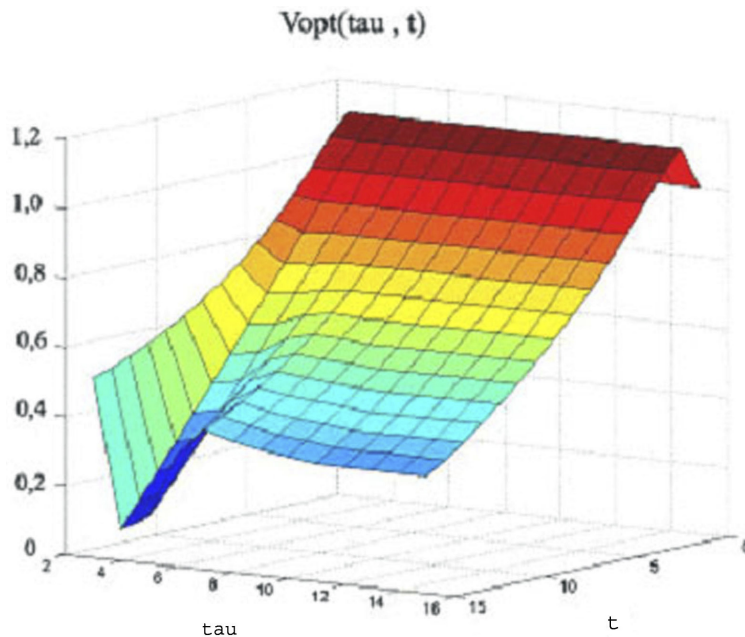


Рис 1. Трехмерный график зависимости параметрического семейства моделей долговечности оптимальной структуры и сложности $V^*(\tau; t)$ в зависимости от параметра τ — размеров временного интервала ретроспекции ($0 \leq \tau \leq T_{\max}$).

рованию остаточного ресурса полимерных волокнистых композитов (ПВК). Рассматривалось комбинированное воздействие фактора упрочнения и фактора старения на композит. В качестве остаточного ресурса V исследуемого ПВК, рассматривается прочность, измеряемая в МПа. Исследуемый интервал изучения изменения остаточного ресурса составляет $T_{\max} = 15$ лет. Обозначения: τ_r — размер временного интервала ретроспекции в годах ($0 \leq \tau_r \leq t_{\max}$); t — время.

В качестве исходных данных были использованы результаты проведенных физических экспериментов по измерению остаточного ресурса ПВК [16, 17, 25]. Измерения остаточного ресурса проводились с интервалом в 1 год. Введем обобщенный показатель сохраняемости $k_V(t)$, представляющий собой отношение остаточного ресурса ПВК $V(t)$ в момент времени t к начальному значению остаточного ресурса V_0 : $k_V(t) = V(t)/V_0$. По разработанной методологии для каждого текущего значения параметра — верхней границы интервала ретроспекции $t_{\min}$ решалась задача построения оптимальной модели долговечности оптимальной структуры и сложности $V^{N^*}((u^{N^*})^*; t)$ (8).

Для каждого текущего значения параметра на основе построенной оптимальной модели долговечности оптимальной структуры и сложности затем решалась задача построения прогнозируемой зависимости остаточного ресурса ПКМ на временном интервале $[t_{\min}, t_{\max}]$. В соответствии с тем, что введенное многопараметрическое семейство моделей долговечности $\{V^N(u^N; t)\}_{N=1}^{\infty}$, представлено в виде суперпозиции уравнений Аррениуса (2)–(3), и отражает характер деструктивных процессов, описываемых на микроуровне физическими моделями вида (1), а модель долговечности оптимальной структуры и сложности $V^{N^*}((u^{N^*})^*; t)$ принадлежит данному многопараметрическому семейству, то, в соответствии с полученными результатами [18–24], следует ожидать, что данная модель будет наиболее адекватно описывать реальную временную зависимость остаточного ресурса на интервале проспекции $[t_{\min}, t_{\max}]$. Проведенные вычислительные эксперименты позволили установить, что зависимость параметрического семейства моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности $\{V^*(\tau_r; t)\}$ в зависимости от параметра τ_r , характеризующего размеры интервала ретроспекции, носит колебательный характер. Характер колебательного процесса в значительной степени зависит от того, в какой мере на исследуемом временном отрезке проявляются фундаментальные закономерности, характеризующие процессы, происходящие на микро- и макроуровне, и оказывающие определяющее влияние на изменение остаточного ресурса композита.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование перспективных возможностей применения современных положений кинетической теории прочности для разработки оптимальных моделей долговечности композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды. С помощью предложенного подхода построена уточненная обобщенная модель долговечности композитов в экстремальных условиях на основе современных положений кинетической теории прочности. В рамках вариационных постановок предложены и разработаны эффективные методы прогнозирования определяющих характеристик (остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности) композитов в экстремальных условиях внешней среды, характерных для резкоконтинентального климата Арктической и Субарктической зоны. Оценка параметров деструктивных химических реакций в композитах на основе разработанной методологии позволила построить эффективные обобщенные модели долговечности на долгосрочный период, провести сравнительную оценку степени влияния различных экстремальных факторов на долговечность композита, а также осуществить конструктивный анализ влияния отдельных экстремальных факторов на долговечность. Оценка параметров деструктивных химических реакций в полимерных композитах, которые инициированы воздействием экстремальных физических факторов внешней среды, а также их сравнительный конструктивный анализ может позволить разработать методику синтеза новых материалов с повышенной долговечностью.

Возможность оценки на основе физических экспериментов определяющих параметров физико-химических процессов, происходящих на микроуровне, может позволить в единообразной форме исследовать существенные особенности влияния различных видов внешних воздействий на скорость преобладающего процесса старения, а также разработать функциональные соотношения, характеризующие соответствующие количественные связи, описывающие влияние различных видов внешних воздействий на скорость преобладающего процесса старения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПНГ ФИЦ “ЯНЦ СО РАН”, Якутск, Россия и ИПРИМ РАН, Москва, Россия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уржумцев Ю. С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов. М.: Наука, 1982. 222 с.

2. Каблов Е. Н., Старцев О. В. Влияние внутренних напряжений на старение полимерных композиционных материалов // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57. № 5. С. 805–822.
3. Степанов М. Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с.
4. Bakulin V. N., Ostriuk A. V. The combined thermal and mechanical effect of radiation and shock waves on a multilayer orthotropic shell with a heterogeneous coating. J. Appl. Math. Mech. 78 (2), 155–162 (2014).
5. Bakulin V. N., Ostriuk A. V. Nonstationary deformation and failure of composite shells. Mech. Solids. 43 (4), 635–641 (2008).
6. Bakulin V. N., Bugay I. V., Ostriuk A. V. Universal Numerical Code For Modeling Of Non-Static Deformation And Destruction Of Sandwich Thin Constructions Under Action Of Intensive Energy Fluxes. Marine Intellectual Technologies. 2010. № 2(8). P. 3–6.
7. Бакулин В. Н., Острик А. В., Помапенко А. И. Расчет коэффициента Грюнайзена при облучении гетерогенного материала с полыми микросферами и пластическим связующим // Проблемы машиностроения и надежности машин. М. 2001. № 2. С. 84–89.
8. Петров М. Г. Прочность и долговечность элементов конструкций. Подход на основе моделей материала как физической среды. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 463 с.
9. Петров В. А., Башкарев А. Я., Веттегрен В. И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993.
10. Реутов А. И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ. 2009. № 2. С. 127–141.
11. Lurie S. A., Solyaev Yu. O., Nguen D. Q. u.a. Experimental investigation modeling the impact of thermocycling on mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastic // Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal. 2015. V. 3. № 7. P. 1–13.
12. Dumansky A. M., Tairova L. P. Time-dependent behavior of carbon fibre reinforced laminates // Proceedings of the Second Int. Conference on advanced composite materials and technologies for aerospace applications. Wrexham, North Wales, United Kingdom, 2012. P. 75–79.
13. Реутов А. И. Прогнозирование надежности строительных изделий из ПМ. М.: РИФ “Стройматериалы”. 2007. 184 с.
14. Потапова Л. Б., Ратнер С. Б. Прогноз долговечности хрупких полимеров по результатам кратковременных испытаний на прочность // МКМ. 1990. № 4. С. 742–745.
15. Кикоин А. К., Кикоин И. К. Молекулярная физика. М.: Лань, 2008. 408 с.
16. Регель В. Р., Слуцкер А. Ж., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 660 с.
17. Уржумцев Ю. С., Черский И. Н. Научные основы инженерной климатологии полимерных и композитных материалов // Механика композитных материалов. 1985. № 4. С. 708–714.
18. Булманис В. Н., Старцев О. В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волоконистых композитов в результате климатического воздействия / Препринт. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1988. 32 с.
19. Булманис В. Н., Ярцев В. А., Кривонос В. В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // Механика композит. материалов. 1987. № 5. С. 915–920.
20. Gusev E. L., Bakulin V. N. Variation formulations of inverse problems in forecastting the residual life of composites // Doklady Physics. 2018. V. 63. № 9. P. 388–392.
21. Gusev E. L., Bakulin V. N. Optimal control under a decrease in the thermal-field intensity based on selection of the heterogeneous – construction structure in the variational formulation // Doklady physics. 2018. V. 63. № 5. P. 213–217. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1392/1/012008>
22. Gusev E. L., Bakulin V. N. Variational Methods of Solving Problems on Control of the Intensity of a Temperature Field // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021. V. 94, № 5. P. 1117–1123.
23. Gusev E. L., Bakulin V. N. Generalized Durability Models and their Application to Solving Problems on Predicting the Defining Characteristics of Composites // Mechanics of Composites Materials. 2022. V. 58. № 3. P. 355–364
24. Gusev E. L., Bakulin V. N. Mathematical Methods for Predicting the Determining Characteristics of Composite under the Influence of Extreme Factors // AIP Conference Proceedings, 2023, 2948(1), 020030.
25. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А. и др. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 245–256.

AN APPROACH FOR CONSTRUCTING REFINED GENERALIZED MODELS OF DURABILITY OF COMPOSITES IN EXTREME CONDITIONS BASED ON MODERN PROVISIONS KINETIC THEORY OF STRENGTH

E. L. Gusev^{a,b}, V. N. Bakulin^c

^a *Institute of Oil and Gas Problems of the Federal Research Center “Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia*

^b *Institute of Mathematics and Informatics, North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

^c *Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS B. N. Chetverushkin

An approach is proposed for constructing refined generalized models of the durability of composites under extreme conditions based on modern provisions of the kinetic theory of strength. Within the framework of variational formulations, effective methods for predicting the defining characteristics (residual life, strength, reliability, durability) of composites under extreme environmental conditions have been proposed and developed. The conducted research made it possible to develop a methodology for harmonizing the defining parameters of physical models at the micro level with the corresponding defining parameters of mathematical models at the macro level, which makes it possible to solve the problem of restoring the parameters of physical and chemical processes occurring at the micro level and leading to destructive changes in composites and deterioration of their characteristics over time.

Keywords: kinetic theory of strength, composite materials, variational formulation, forecasting methods, physical, mathematical models, extreme factors, residual life, durability.