Численная оценка кинетических параметров докритического роста трещин в конструкционных клеевых соединениях при длительном статическом нагружении с использованием модели когезионной зоны и экспериментальных данных

А. А. Устинов, П. Г. Бабаевский, Н. А. Козлов, Н. В. Салиенко

Предложен численный метод моделирования и расчета кинетики докритического подрастания трещины с построением кинетических *G – V* диаграмм для конструкционных клеевых соединений при длительном статическом нагружении. Нагрузку задавали глобальным докритическим раскрытием трещины по моде I. Моделирование и расчеты проведены с использованием модели когезионной зоны, имплантированной в метод конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS. Параметры закона когезионной зоны и кинетики докритического роста трещин экспериментально определяли для образцов в виде двойной консольной балки из пластин алюминиевого сплава, склеенных эпоксидным клеем промышленной марки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошую корреляцию.

Ключевые слова: конструкционные клеевые соединения, кинетика докритического роста трещины, длительная статическая нагрузка, заданное раскрытие трещины, модель когезионной зоны, метод конечных элементов, параметры закона когезионной зоны, кинетическая *G – V* диаграмма.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-10-74-84

Введение

Конструкционные клеевые соединения (ККС) на основе полимерных клеевых композиций представляют собой слоистые структуры, состоящие из жестких склеиваемых материалов и адгезионно связывающего их тонкого клеевого слоя и играют важную роль в аэрокосмической и автомобильной технике, обеспечивая возможности развития новых технологий сборки и существенный выигрыш в весе по сравнению с механическими соединениями и сваркой [1 – 4].

Важными задачами при разработке таких соединений, обеспечении их несущей способности и долговечности являются оценка и прогнозирование устойчивости к образованию и росту межслоевых трещин при различных внешних воздействиях [4, 5]. Аналитические, численные и экспериментальные методы решения этих задач в случае ККС, как и близких к ним слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ), преимущественно базируются на подходах линейной упругой механики разрушения (ЛУМР). Применимость подходов ЛУМР к оценке трещиностойкости ККС требует внесения поправок, обусловленных проявлением податливости склеиваемых материалов и вязко-упругости клеевого слоя при его достаточно большой толщине. Однако, в случае жестких склеиваемых материалов с высоким модулем упругости при малой толщине клеевого слоя и незначительном вкладе его в общую жесткость ККС и адгезионным характером разрушения эти поправки могут не учитываться [4 – 8].

В численном моделировании межслоевой трещиностойкости ККС и ПКМ чаще всего используют имплантацию (в рамках ЛУМР) микро-

механической модели когезионной зоны (МКЗ) и ее закона в метод конечных элементов (МКЭ) в пакетах прикладных программ ANSYS® и ABAQUS (методы МКЭ/МКЗ), что позволяет моделировать не только рост существующих трещин, но и их зарождение в местах концентрации напряжений [6 – 12]. Наибольшее количество таких работ посвящено оценке трещиностойкости образцов типа двойной консольной балки (ДКБ) с межслоевой трещиной при первой моде нагружения — нормальном раскрытии. При этом использование экспериментальных данных о параметрах закона когезионной зоны (ЗКЗ), то есть о ее локальных свойствах, существенно увеличивают точность и уменьшают объем вычислений при оценке трещиностойкости [11, 12].

В настоящее время численные методы МКЭ/МКЗ применительно к ККС и слоистым ПКМ разработаны и используются преимущественно для оценки критических параметров трещиностойкости при предельных нагрузках. Значительно меньше работ посвящено оценке кинетики докритического роста трещин, хотя данные о зависимости скорости подрастания трещины от нагрузки на нее, так называемые кинетические или $G - V$ диаграммы являются основой прогнозирования долговечности конструкций с дефектами при заданных условиях эксплуатации. Имеются сравнительно немногочисленные данные о применении метода МКЭ/МКЗ для оценки устойчивости межслоевых трещин к усталостному циклическому нагружению на основе теории накопления повреждений в когезионной зоне (КЗ) с оценкой приращения некоторой формальной степени поврежденности КЗ от 0 (в исходном состоянии) до 1 (при критическом разрушении) в двух вариантах [12]. В первом случае поведение модели анализируют в каждом цикле нагружения, рассматриваемом как монотонное возрастание нагрузки от нуля до максимального для данного цикла, но не критического, значения, а во втором — с использованием так называемой огибающей нагрузки, учитывающей только максимальные ее значения в каждом цикле. Применение первого метода ограничивается малоцикловыми нагрузками из-за резкого возрастания объема вычислений с ростом числа циклов. Второй подход эффективен при многоцикловых нагрузках, но не учитывает весь спектр действующих на трещину нагрузок. В обоих подходах формальному параметру повреждаемости КЗ не придается какого-либо физического смысла с точки зрения процессов, вызывающих повреждение КЗ.

Данных об адаптации численного метода МКЭ/МКЗ к оценке кинетики докритического роста трещин при длительных статических нагрузках не найдено.

Цель работы — решение задачи адаптации численного метода МКЭ/МКЗ к оценке кинетики докритического роста трещин при длительных статических нагрузках на примере образцов ККС в виде ДКБ с межслоевой трещиной, раскрываемой по моде I.

В работе представлены:

— алгоритм и методика МКЭ/МКЗ моделирования докритического подрастания трещины в ККС при длительной статической нагрузке;

— численная оценка кинетики докритического роста трещины, построение кинетической $G - V$ диаграммы для образцов ККС на основе алюминиевого сплава и эпоксидного клея (Д-16-ВК-9) с использованием экспериментально определенных локальных деформационно-прочностных свойств ККС и критических параметров их трещиностойкости и сравнение расчетных диаграмм с экспериментально полученными.

Образцы и методы исследования

Образцы ККС типа ДКБ с различным способом нагружения трещины

Для экспериментальных исследований и численного моделирования использовали наиболее распространенные образцы ККС типа ДКБ из пластин алюминиевого сплава и эпоксидного клея (Д-16 – ВК-9) с предварительно заданной трещиной, нагружаемой раскрытием по моде I приложением усилия P к концам трещины (рис. 1*a*) или разведением ее концов с помощью винтов на величину раскрытия Δ (рис. 1*b*).

Хотя первый тип нагружения наиболее широко используется для оценки критических параметров трещиностойкости образцов ККС в виде ДКБ, его применение для определения кинетических параметров докритического подрастания трещины затруднено. Это обусловлено тем, что при приложении заданной докритической растягивающей силы P к краям трещины нагрузка на нее, или трещинодвижущая сила (G_I), определяемая в ЛУМР, прямо пропорциональна квадрату длины трещины a:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{EB^2h^3}, \qquad (1a)$$

где E — модуль упругости, h — полутолщина, B — ширина склеиваемых пластин.

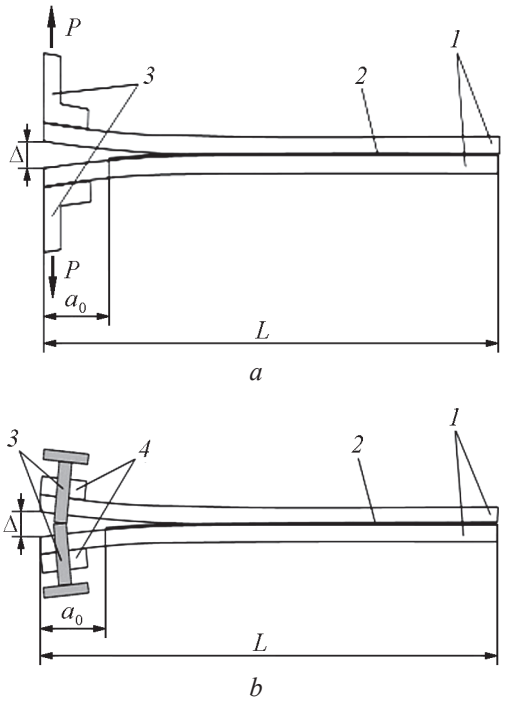

Рис. 1. Схематические изображения образцов ККС типа ДКБ с заданной трещиной, нагружаемых по моде *I* приложением усилия *P* (*a*) и заданного раскрытия трещины Δ (*b*): *1* — склеенные пластины; *2* — клеевой слой толщиной до 100 мкм; *3* — уголки для закрепления в зажимах разрывной машины (*a*) и соосные винты для задания раскрытия трещины в опорных накладках *4* (*b*); a_0 — длина начального дефекта, задаваемого фторопластовой пленкой; *L* — длина образца.

Fig. 1. Schematic images of samples of structural adhesive joints of the DCB type with a given crack, loaded in the mode I by applying a force *P* (*a*) and a given crack opening Δ (*b*): *1* — glued plates; *2* — an adhesive layer up to 100 μm thick; *3* — corners for fixing in the clamps of the breaking machine (*a*) and coaxial screws for setting the crack opening in the support plates *4* (*b*); a_0 — the length of the initial defect set by the fluoroplastic film; *L* — the length of the sample.

При этом состояние нагруженной трещины является нестабильным ($dG_I/da > 0$), то есть ее докритическое подрастание приводит к резкому возрастанию нагрузки и к быстрому росту трещины. Это было подтверждено экспериментально при разработке метода дистанционного контроля докритического роста трещин в образцах типа ДКБ при нагружении по моде *I* [13].

При заданном докритическом раскрытии трещины Δ нагрузка на нее обратно пропорциональна длине трещины *a* в 4-й степени:

$$G_I = \frac{3\Delta^2 h^3 E}{16a^4}. \quad (1б)$$

В этом случае состояние нагруженной трещины является стабильным ($dG_I/da<0$), то есть докритическое подрастание приводит к уменьшению нагрузки на нее. Поэтому в данной работе при экспериментальной и численной оценке критических параметров трещиностойкости использовали первый тип нагружения, а кинетики докритического подрастания трещины — второй.

Численное моделирование методом МКЭ/МКЗ

В численном методе МКЭ/МКЗ при оценке трещиностойкости образцов ККС типа ДКБ с межслоевым ростом трещины модельная (числовая) когезионная зона (КЗ) вводится между двумя противоположными частями твердотельной модели МКЭ (полубалками) в виде тонкого слоя, в котором действуют силы сцепления, подчиняющиеся определенному закону, называемому законом когезионной зоны (ЗКЗ) [6 – 9]. При нормальном раскрытии трещины по моде I ЗКЗ соответствует упругому возрастанию локального напряжения растяжения σ в слое до максимального (критического) значения и неупругому его спаду со смещением (раскрытием) слоя δ до предельного значения. При этом форма ЗКЗ сравнительно мало влияет на получаемые результаты и задается, исходя из удобства расчетов. Чаще всего применяют билинейный и экспоненциальный законы, соответственно, с линейным и асимптотическим спадом напряжения до 0 при предельном раскрытии КЗ.

Алгоритм численного моделирования докритического подрастания трещины в ККС при длительной статической нагрузке и его адаптация к методу МКЭ/МКЗ базируются на суммировании микроступенчатых подрастаний трещины на длину КЗ вследствие потери ее несущей способности при длительном воздействии факторов окружающей среды с учетом термофлуктуационной теории долговечности [14, 15] и практического опыта в разработке экспериментальных методов контроля, в том числе дистанционного, за кинетикой докритического роста трещин в ККС в лабораторных и космических условиях [16].

Важнейшее значение при этом имеет использование четких физических представлений о КЗ, ее законе (ЗКЗ) и длине ($l_{КЗ}$), обусловленных локальными деформационно-прочностными свойствами ККС. Основой таких представлений служит микромеханическая модель Баренблатта — модель

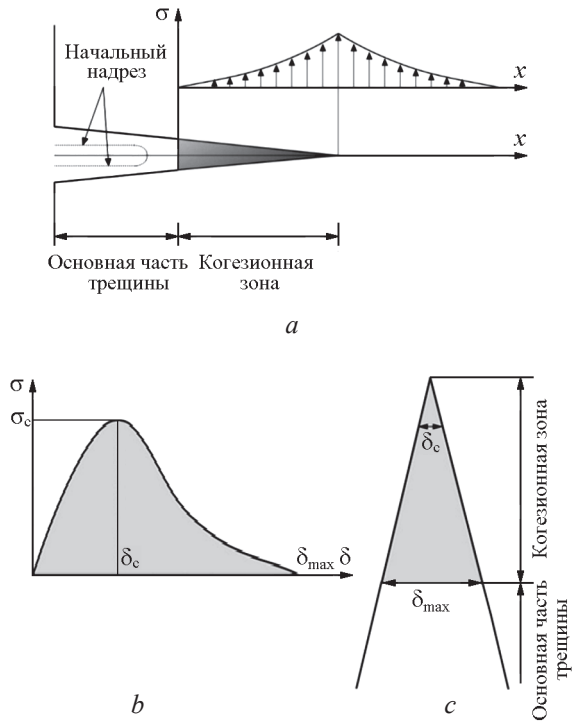

Рис. 2. Схема и закон КЗ при раскрытии трещины по моде *I*: *a* — распределение локального напряжения вдоль распространения трещины; *b* — экпоненциальная форма ЗКЗ; *c* — предельные размерные характеристики раскрытия КЗ.

Fig. 2. The scheme and the CZ law for the crack opening in mode *I*: *a* — the distribution of the local stress along the crack propagation; *b* — the exponential form of the short circuit; *c* — the limiting dimensional characteristics of the short circuit opening.

устойчивости равновесной трещины в упругом теле за счет формирования КЗ в ее кончике, разработанная в рамках ЛУМР [17] и исключающая сингулярность напряжений в кончике трещины (рис. 2*a*).

Согласно этой модели росту трещины препятствуют межмолекулярные (когезионные или адгезионные) связи (силы сцепления) в КЗ. Зависимость этих сил от смещения, то есть ЗКЗ определяется производным потенциала взаимодействия по межмолекулярному расстоянию (локальному смещению) и имеет экспоненциальную форму (рис. 2*b*).

К основным характеристикам экспоненциального ЗКЗ относятся максимальное напряжение или локальная прочность связей в КЗ (σ_C) и ее упругое (δ_C) и максимальное (δ_{max}) деформирование (раскрытие) (рис. 2*b*, 2*c*), разность которых ($\delta_{max} - \delta_C$) или область спада напряжения характеризует величину необратимого предразрушения связей (неупругого раскрытия КЗ), а также критическая длина КЗ ($l_{КЗ}$). Площадь под кривой ЗКЗ равна удельной работе разрушения КЗ:

$$\gamma_F = \int_0^{\delta_{max}} \sigma(\delta)\, d\delta, \tag{2a}$$

а ее удвоенная величина — критическому значению интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины (G_{IC}), используемому в ЛУМР в качестве глобального параметра сопротивления росту трещины или трещиностойкости (ТС):

$$G_{IC} = 2\gamma_F = 2\int_0^{\delta_{max}} \sigma(\delta)\, d\delta. \tag{2b}$$

Наоборот, производная интенсивности высвобождения упругой энергии G_I как нагрузки на трещину, или трещинодвижущей силы (ТДС) по раскрытию КЗ даёт ЗКЗ:

$$\frac{dG_I}{d\delta} = \sigma(\delta). \tag{2c}$$

В обобщенном виде экспоненциальная форма ЗКЗ описывается соотношением:

$$\sigma(\delta) = e\sigma_C \frac{\delta}{\delta_C} \cdot e^{-\frac{\delta}{\delta_C}}, \tag{2d}$$

где δ и δ_C — текущее раскрытие КЗ и ее раскрытие при σ_C соответственно (рис. 2*b*), e — основание натурального логарифма, равное 2,71.

При этом критические параметры экспоненциального ЗКЗ (σ_C, δ_C, δ_{max}, γ_F, G_{IC} и $l_{КЗ}$) связаны между собой соотношениями:

$$\delta_C = \frac{\delta_{max}}{e}, \tag{3a}$$

$$G_{IC} = 2\gamma_F = \sigma_C \delta_{max}, \tag{3b}$$

$$l_{КЗ} = \frac{\pi}{8}\frac{kEG_{IC}}{\sigma_C^2}, \tag{3c}$$

где E — модуль Юнга в направлении действия нагрузки на трещину, k — константа, зависящая от типа напряженно-деформированного состояния трещины: для плоско-напряженного состояния $k = 1$, для плоско-деформированного состояния $k = 1 - \nu^2$, где ν — коэффициент Пуассона.

Наклон начального линейного участка ЗКЗ при $\delta < \delta_C$, то есть коэффициент упругости КЗ равен:

$$K = \frac{\sigma_C}{\delta_C}. \tag{3d}$$

Все перечисленные характеристики КЗ (ЗКЗ в целом и его основные параметры, в том числе

критическая длина) в модели Баренблатта являются материальными константами (локальными микромеханическими свойствами) и не зависят от длины трещины и нагрузки на нее. Это предопределяет возможность разработки простого алгоритма численной оценки кинетики докритического подрастания трещины при заданной статической нагрузке на нее, обеспечивающей стабильное состояние трещины, то есть при ее постоянном раскрытии. Любая заданная докритическая нагрузка на трещину, рассчитываемая в рамках ЛУМР для образцов типа ДКБ при заданном раскрытии по формуле (1b), меньшая чем сопротивление ее росту ($G_I < G_{IC}$), вызывает возникновение стабильной КЗ, длина которой определяется соотношением (3b). С течением времени под воздействием механической нагрузки и факторов окружающей среды в КЗ накапливаются разрывы сдерживающих связей, вероятнее всего по термофлуктуационному механизму. Это приводит к уменьшению локальной прочности сцепления σ_C и предельного раскрытия δ_{max} КЗ и, соответственно, сопротивления росту трещины G_{IC}. Когда G_{IC} станет равной или меньшей, чем нагрузка на трещину G_I, трещина прорастает на длину КЗ при сохранении устойчивости. В соответствие с новой нагрузкой на трещину, меньшей критической, возникает новая стабильная КЗ, которая с течением времени под воздействием факторов окружающей среды также теряет несущую способность. Ее разрушение приводит к следующему подрастанию трещины. Таким образом происходит микроступенчатое подрастание трещины аналогично раскрытию застежки “молния” [17] до тех пор, пока продолжительность (период) очередной ступени не станет слишком большой. Количество ступеней, их периоды и соответствующие длины КЗ позволяют определять кинетику докритического подрастания.

Адаптацию метода МКЭ/МКЗ для численных расчетов кинетических параметров докритического подрастания трещины при заданном ее раскрытии на величину Δ по моде I в образцах ККС типа ДКБ в соответствие с предложенным алгоритмом и с использованием параметров ЗКЗ проводили в среде ANSYS® Mechanical APDL Release 19R2 [18]. Твёрдотельную 3D геометрическая модель ДКБ, форма и размеры которой аналогичны физическому образцу, строили в графическом редакторе программного комплекса ANSYS. Из представленных в библиотеке программного комплекса типов конечных элементов в модели использовали твёрдотельные элементы (ТЭ) Solid 185 для разбиения сеток конечных элементов в полубалках и когезионные, или интерфейсные элементы (ИЭ) Inter 205 — в когезионном слое. Связь между совпадающими узлами твёрдотельных и интерфейсных элементов — жёсткая. В опции Material Models задавали упругие характеристики полубалок. В рамках данной работы использовали ИЭ такой длины (l_e), чтобы по длине когезионной зоны $l_{КЗ}$ их умещалось 4, то есть $l_e = l_{КЗ}/4$ [7, 10]. Интерфейсные элементы настраивали под экспоненциальный ЗКЗ вводом параметров C1 (прочность КЗ — σ_C) и C2 (предельная деформация КЗ — δ_{max}). При этом учитывали, что длина численной КЗ соответствует длине ИЭ, лежащих на ниспадающей части ЗКЗ, а длина физической КЗ — длине области необратимого предразрушения впереди кончика трещины.

После запуска программы, что соответствует начальному моменту времени $t_0 = 0$, созданный виртуальный образец ККС расслаивается заданным раскрытием трещины (Δ = const) с ее начальной длиной, $a(t_0)$ и длиной когезионной зоны $l_{кз}(t_0)$. По формуле (2d) с использованием имеющихся значений $\sigma_C(t_0)$ и $\delta_{max}(t_0)$ и начальной нагрузки на трещину $G_I(t_0)$, рассчитываемой по формуле (1b) и меньшей, чем сопротивление ее росту ($G_I(t_0) < G_{IC}(t_0)$), строится начальная кривая ЗКЗ. Удвоенная площадь под этой кривой, равная в модели Баренблатта произведению $\sigma_C(t_0)\cdot\delta_{max}(t_0)$, соответствует начальному сопротивлению росту трещины $G_{IC}(t_0)$.

Периоды времени, требуемые для микроступенчатого подрастания трещины при докритическом статическом нагружении с соответствующими параметрами ЗКЗ, определяли, строя каждый раз отдельную модель. Так, 1-й период времени t_1, после которого начальная трещина $a(t_0)$ ступенчато подрастает на длину ее КЗ $\Delta a(t_1) = l_{КЗ}(t_0)$ и достигает длины $a(t_1) = a(t_0) + \Delta a(t_1)$, рассчитывали как время, за которое основные параметры ЗКЗ изменятся так, что определяемое ими начальное сопротивление росту трещины $G_{IC}(t_0)$ уменьшится до начальной нагрузки на трещину $G_I(t_0)$, то есть когда $G_{IC}(t_0) = G_I(t_0)$. На подросшую после 1-го периода времени трещину длиной $a(t_1)$ при том же ее раскрытии Δ действует нагрузка $G_I(t_1)$, меньшая, чем критическая для этой трещины в это время, то есть $G_I(t_1) < G_{IC}(t_1)$. При этом трещина стабильна, и в ней развивается КЗ длиной $l_{КЗ}(t_1)$. Второй период времени t_2, после которого трещина $a(t_1)$ ступенчато подрастет на длину $\Delta a(t_2) = l_{КЗ}(t_1)$ и достигнет длины $a(t_2) = a(t_0) + \Delta a(t_1) + \Delta a(t_2)$, рассчитывали как время, за которое основные параметры ЗКЗ изменятся так, чтобы определяемое ими начальное в этом периоде сопротивление росту трещины

$G_{IC}(t_1)$ уменьшилось до нагрузки на трещину после 1-го периода $G_I(t_1)$. Аналогичным образом проводили расчеты последующих периодов микроступенчатого подрастания трещины при постоянном ее раскрытии. При этих расчетах убывающие значения C1 (σ_C) и C2 (δ_{max}) вводились каждый раз в интерфейсные элементы для следующей модели с учетом длины подросшей в предыдущей модели трещины. В настройках решателя для контроля роста тещины использовали опцию Arc-lenght options [18].

Общую длину подрастающей трещины за n периодов времени

$$t_n = \sum_{i=1}^{n} t_i \qquad (4a)$$

определяли суммой

$$a(t_n) = a(0) + \sum_{i=1}^{n} \Delta a(t_i), \qquad (4b)$$

где $a(0)$ — начальная длина трещины, i — номер временного интервала, $\Delta a(t_i)$ — приращение длины трещины в соответствующем временном интервале. По полученным значениям приращения длины трещины $\Delta a(t_i)$ в каждом временном интервале определяли среднюю скорость докритического подрастания трещины $V(t_i) = \Delta a(t_i)/t_i$, а по ее длине в этом интервале и формуле ЛУМР (1b) — нагрузку на трещину $G_I(t_i)$. Комбинацией полученных значений $V(t_i)$ и $G_I(t_i)$ строили искомую кинетическую $G - V$ диаграмму, обычно, в двойных логарифмических координатах. Ее аналитическая форма аналогична формуле Пэриса для динамической усталости:

$$V = \frac{da}{dt} = A(G_I)^m, \qquad (5)$$

где m — тангенс угла наклона прямолинейного участка $G - V$ диаграммы, A — предэкспоненциальный множитель. Эти параметры, как материальные характеристики ККС, могут использоваться для прогнозирования их долговечности.

Экспериментальные методы

Необходимые для численных расчетов зависимости локальных деформационно-прочностных свойств ККС как параметров ЗКЗ (прочности сцепления σ_C и предельной деформации δ_{max}) от времени выдержки экспериментально определяли методом нормального отрыва склеиваемых пластин с малой площадью контакта, описанным в работе [10]. Толщину клеевой прослойки между пластинами и площадь контакта задавали с помощью фторопластовых пленок толщиной 10 мкм с вырезанным посередине квадратным отверстием 10 × 10 мм. Пленку накладывали на клеевой слой перед приведением пластин в контакт и отверждением клеевого слоя. Для получения клеевых соединений с заданным размером адгезионного контакта использовали отрезки Т-образного профиля из алюминиевого сплава Д-16 с очищенной и обезжиренной плоской поверхностью площадью 60 × 60 мм^2 и клей ВК-9.

Отверждение клея после его нанесения на склеиваемые пластины и закрепления последних в струбцинах проводили при комнатной температуре в течение 24 ч с последующей термообработкой при 120 °С в течение 2 ч. Полученные образцы выдерживали различное время (до $9 \cdot 10^6$ с) в лабораторных условиях под нагрузкой, равной примерно половине от разрушающей, и через определенные промежутки времени испытывали на нормальный разрыв на разрывной машине Zwick/Roell Z010. Образцы разрывали при скорости движения траверсы разрывной машины 0,5 мм/мин, записывая диаграмму усилие – деформация с помощью цифрового интерфейса.

По предельному усилию разрыва F_C и площади адгезионного контакта S рассчитывали локальную прочность соединения: $\sigma_C(t) = F_C(t)/S$.

Прямые экспериментальные данные о кинетических параметрах докритического подрастания трещины при ее заданном раскрытии были получены при контрольных наземных испытаниях образцов клеевых соединений в виде ДКБ из листов алюминиевого сплава Д-16 и различных типов промышленных клеевых композиций, в том числе ВК-9, в рамках пассивного (“Компласт”) и активного (“КРТ”) космических экспериментов (КЭ) по оценке и прогнозированию долговечности ККС и ПКМ в околоземных космических условиях [19]. В пассивном КЭ экспериментальные образцы ККС подвергали длительной выдержке в условиях околоземной орбиты с последующим определением на Земле параметров трещиностойкости и оценкой характера разрушения ККС, изменения структуры и свойств клеевых слоев и поверхности разрушения. В активном КЭ дистанционно контролировали кинетику докритического подрастания трещины (ДКПТ) в процессе длительной выдержки образцов при квазистатической докритической нагрузке.

В обоих экспериментах проводили контрольные наземные испытания в лабораторных условиях с использованием образцов типа ДКБ, получаемых склеиванием пластин алюминиевого сплава Д-16 размером 120 × 20 × 2 мм с очищенной и обе-

зжиренной поверхностью с помощью клея ВК-9. Толщину клеевой прослойки между пластинами задавали с помощью закладных фторопластовых пленок толщиной 100 мкм, которые служили также для задания начальной трещины в клеевом соединении. Отверждение клея после его нанесения на склеиваемые пластины и закрепления последних в струбцинах проводили при комнатной температуре в течение 24 ч с последующей термообработкой при 120 °С в течение 2 ч. На склеенные пластины для повышения их жесткости наклеивали дополнительные металлические пластины толщиной 5 мм. На концах образцов создавали соосные винты, обеспечивающие заданное раскрытие трещины (рис. 1*b*). Вначале задавали небольшое подрастание области закладки фторопластовой пленки, фиксируя начальную длину трещины $a(0)$ и ее заданное раскрытие Δ, обеспечивающее нагрузку на трещину, рассчитываемую по формуле (1b) и меньшую критической. Нагруженные образцы выдерживали длительное время в лабораторных условиях в эксикаторе, фиксируя через определенные промежутки времени изменение длины трещины с помощью катетометра и установки для дистанционного контроля КРТ. Заметное докритическое подрастание трещины при начальной нагрузке $G_I(t_0)$, равной примерно 80 % от критической $G_{IC}(t_0)$, происходило в течение порядка $9{\cdot}10^6$ с (примерно 4 месяца), после чего рост трещины существенно замедлялся. Докритическое подрастание трещины, как и критический рост, протекало по адгезионному механизму.

Комбинацией кинетических кривых изменений скорости докритического подрастания трещины и нагрузки на нее во времени, определяемых по возрастанию ее длины, строили в двойных логарифмических координатах кинетическую $G - V$ диаграмму.

Результаты и их обсуждение

Экспериментально полученные зависимости параметров ЗКЗ (локальной прочности сцепления σ_C и предельной деформации δ_{max}) от времени выдержки, необходимые для численных расчетов кинетических параметров докритического роста трещины в образцах ККС типа ДКБ на основе алюминиевого сплава Д-16 и клея ВК-9, приведены на рис. 3.

Численные расчеты кинетических параметров докритического роста трещины в образцах ККС Д-16-ВК-9 типа ДКБ при общей длительности нагружении $t_n = 9{\cdot}10^6$ с, заданном раскрытии трещины

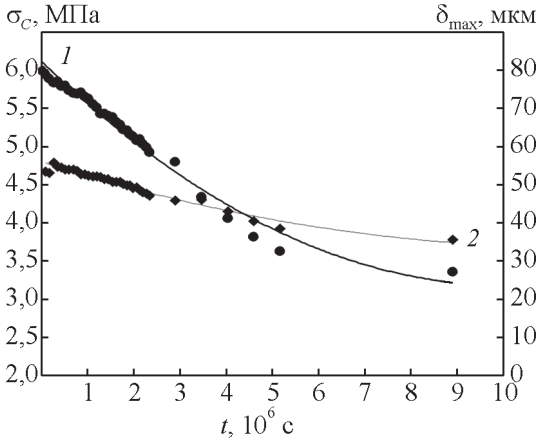

Рис. 3. Зависимости локальной прочности сцепления σ_C и предельной деформации δ_{max} клеевого соединения Д-16-ВК-9 от длительности выдержки t.

Fig. 3. Dependences of the local bonding strength σ_C and the ultimate deformation δ_{max} of the adhesive joint D-16-VK-9 on the exposure duration t.

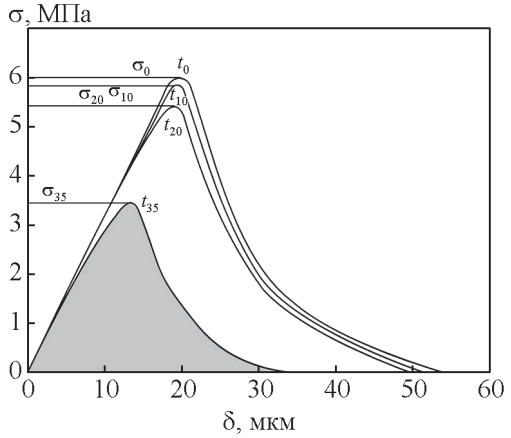

Рис. 4. Расчетные кривые ЗКЗ, полученных в модельных расчетах методом МКЭ/МКЗ кинетических параметров докритического роста трещины в образцах клеевых соединений Д-16-ПК-9 типа ДКБ при длительном докритическом нагружении заданным раскрытием трещины ($\Delta = 5{,}6$ мм) с начальной длиной $a(t_0) = 13{,}0$ мм, $t_{35} = 9{\cdot}10^6$ с.

Fig. 4. Calculated curves of the *CZ* law obtained in model calculations by the FEM/*CZM* method of kinetic parameters of subcritical crack growth in samples of D-16-PK-9 type DCB adhesive joints under prolonged subcritical loading with a given crack opening ($\Delta = 5{,}6$ mm) with an initial length $a(t_0) = 13{,}0$ мм, $t_{35} = 9{\cdot}10^6$ с.

($\Delta = 5{,}6$ мм) и ее начальной длиной $a(t_0) = 13{,}0$ мм проводили по разработанной методике МКЭ/МКЗ в среде ANSYS® Mechanical APDL Release 19R2. Упругие характеристики образцов принимали соответствующими алюминиевому сплаву Д-16: мо-

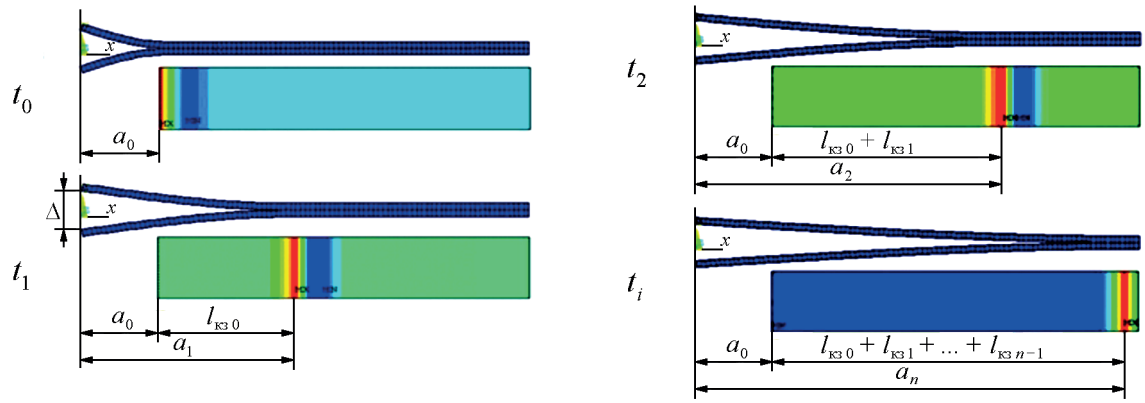

Рис. 5. Примеры получаемых изображений изменения длины трещины и нагрузки на нее в численных экспериментах методом МКЭ/МКЗ в различные периоды времени от $t_0 = 0$ до $t_n = 9{\cdot}10^6$ с.

Fig. 5. Examples of the obtained images of changes in the crack length and load on it in numerical experiments using the method FEM/*CZM* in different time periods from $t_0 = 0$ to $t_n = 9{\cdot}10^6$ s.

дули Юнга $E_{11} = E_{22} = E_{33} = 70$ ГПа, модули сдвига $G_{11} = G_{12} = G_{13} = 26$ ГПа и коэффициенты Пуассона $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0{,}34$. Вид расчетных кривых ЗКЗ при заданном раскрытии трещины ($\Delta = 5{,}6$ мм) с начальной длиной $a(t_0) = 13{,}0$ мм при t_n до $9{\cdot}10^6$ с ($n = 35$) показан на рис. 4.

На рис. 5 приведены наглядные изображения изменения длины трещины и нагрузки на нее в численных экспериментах методом МКЗ/МКЭ в различные периоды времени при общей длительности нагружения $9{\cdot}10^6$ с (примерно 4 месяца) с общим числом рассчитанных моделей и, соответственно, интервалов времени, равным 35.

Сравнения результатов модельных расчетов и экспериментальной оценки кинетических параметров докритического роста трещины в образцах ККС Д-16-ВК-9 типа ДКБ обобщены на рис. 6.

Сравнение полученных результатов показывает удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментально полученных $G - V$ диаграмм для образцов КС Д-16-ВК-9, что свидетельствует об адекватности разработанных экспериментальных и расчетной методик. Основная проблема разработанной методики связана с длительностью экспериментальной оценки усталостного поведения КЗ в адгезионных соединениях. Использование тер-

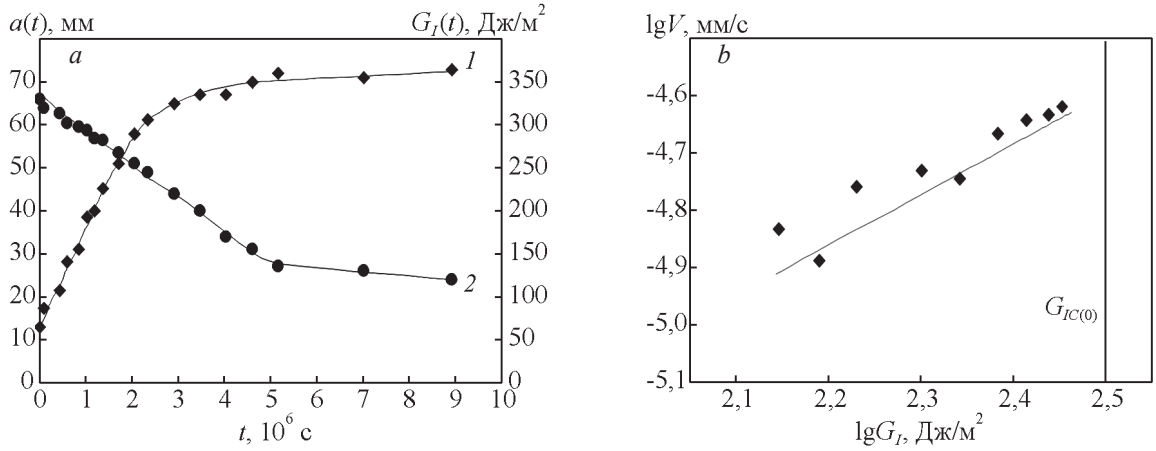

Рис. 6. Экспериментально полученные при контрольных наземных испытаниях образцов ККС Д16-ВК9 в рамках активного космического эксперимента КРТ [13] (точки) и рассчитанные методом МКЭ/МКЗ (линии) для аналогичных образцов зависимости изменения длины трещины и нагрузки на нее при заданном глобальном раскрытии от длительности выдержки при докритическом статическом нагружении (*a*) и $G - V$ диаграммы (*b*).

Fig. 6. Experimentally obtained during control ground tests of samples of structural adhesive joints D16-VK9 in the framework of an active space experiment to control the growth of cracks [13] (points) and calculated by the FEM/CZM method (lines) for similar samples, the dependences of the change in the length of the crack and the load on it at a given global opening on the duration of exposure under subcritical static loading (*a*) and $G - V$ diagrams (*b*).

мофлуктуационной теории долговечности Журкова применительно к оценке долговечности КЗ может быть эффективным путем решения этой проблемы.

Выводы

С использованием макро- и микромеханических подходов ЛУМР к квазихрупкому росту трещины и физических представлений о поведении когезионной зоны разработана полуэмпирическая расчетная методика для оценки кинетических параметров докритического роста трещины в ККС при длительных статических нагрузках и построения $G - V$ диаграммы. Предложенная методика, имплантированная в конечно-элементную модель в пакете прикладных программ ANSYS, позволяет определять изменения длины докритически подрастающей трещины и действующей на нее ТДС в различные периоды времени, что позволяет рассчитывать требуемые кинетические параметры.

Проведены моделирование и расчеты для образцов ККС в виде ДКБ из пластин алюминиевого сплава, склеенных эпоксидным клеем промышленной марки, с использованием экспериментально определенных кинетических параметров закона когезионной зоны. Результаты расчетов согласуются с имеющимися прямыми экспериментальными данными о кинетике докритического подрастания трещины в образцах клеевого соединения.

Литература

1. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Донской А.А. Клеевые технологии в авиастроении. Клеи. Герметики. Технолоии, 2007, № 5, с. 5 – 14.
2. Гладких С.Н., Дворецкий А.Э., Вялов А.И. Новые клеи разработки ОАО “Композит” для изделий ракетно-космической техники. Новости материаловедения. Наука и техника. Изд.: Арпан (Москва), 2016, № 2 (20), с. 6 – 12.
3. Bishopp J. Adhesives for aerospace structures. In Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing. William Andrew: Norwich, UK, 2011, pp. 301 – 344. DOI: 10.1016/B978-1-4377-4461-3.10013-6.
4. Kinloch A.J. Adhesives in Engineering, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 1997, v. 211 (5), pp. 307 – 335.
5. BS 7991, 2001, Determination of the mode I adhesive fracture energy, G_{IC}, of structural adhesives using the double cantilever beam (DCB) specimens, British Standard Institution.
6. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, 1976, v. 6, no. 6, p. 773 – 781, doi:10.1016/0008-8846(76)90007-7.
7. Moslemi M., Khoshravan M. Cohesive zone parameters selection for mode-I prediction of interfacial delamination. Journal of Mechanical Engineering, 2015, v. 61(9), pp. 507 – 516.
8. Alfano M., Furgiuele F., Pagnotta L., Paulino G.H. Analysis of fracture in aluminum joints bonded with a Bi-component epoxy adhesives. J. of Testing and Evaluation, 2010, v. 39(2), paper ID JTE102 753.
9. Chen Z., Adams R.D., DaSilva Lucas F.M. Prediction of crack initiation and propagation of adhesive joints using an energy failure criterion. Engineering Fracture Mechanics, 2011, v. 78, pp. 990 – 1007.
10. Устинов А.А., Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Салиенко Н.В. Использование модели когезионной зоны и метода конечных элементов для анализа трещиностойкости клеевых соединений. Клеи. Герметики. Технологии, 2019, № 8, с. 33 – 38.
11. Turon A., Davila C.G., Camanho P.P., Costa J. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. Engineering Fracture Mechanics, 2007, v. 74(10), pp. 1665 – 1682.
12. Harper P., Hallett S.R. Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination. Engineering Fracture Mechanics, 2008, v. 75(16), pp. 4774 – 4792, doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.06.004.
13. Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Шубин А.Н., Смирнова Т.Н., Новиков Л.С., Черник В.Н. Кинетика докритического роста трещины и G-V-диаграммы клеевых соединений при длительном воздействии факторов космического пространства. Перспективные материалы, 2003, № 2, с. 17 – 23.
14. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел, М.: Наука, 1974, 560 с.
15. Гольдштейн Р.В., Перельмутер М.Н. О кинетике формирования и роста трещин на границе соединения материалов. Изв. РАН. Механика твердого тела, 2012, № 4, с. 32 – 49.
16. Бабаевский П.Г., Шубин А.Н., Вагстафф П.Г. Физико-механические свойства и характер разрушения эпоксиаминных композиций, отвержденных в виде пленок, клеевых прослоек и блочных образцов. Конструкции из композиционных материалов, 1999, № 4, с. 36 – 47.
17. Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. Известия АН СССР. ПМТФ, 1961, № 4, с. 3 – 56.
18. Lindgaard E., Bak B.L.V., Glud J.A., Sjølund J., Christensen E.T. A user programmed cohesive zone finite element for ANSYS. Mechanical, Engineering Fracture Mechanics, 2017, v. 180, pp. 229 – 239.
19. Babaevskiy P.G., Kozlov N.A., Shumov A.E., Novikov L.S., Shaevich S.K., Golden J.L., Kravchenko M. Results of the Komplast experiment

on the long-term exposure of materials specimens on the ISS surface. Advances in Space Research, 2015, vol. 56, no. 10, pp. 2188 – 2195.

References

1. Petrova A.P., Lukina N.F., Donskoj A.A. Kleevye tekhnologii v aviastroenii [Adhesive technologies in the aircraft industry]. Klei. Germetiki. Tekhnoloii — Adhesives. Sealants. Technologies. 2007, no. 5, pp. 5 – 14.
2. Gladkih S.N., Dvoreckij A.E., Vyalov A.I. Novye klei razrabotki OAO "Kompozit" dlya izdelij raketno-kosmicheskoj tekhniki [New adhesives developed by JSC "Composite" for rocket and space technology products]. Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika. Izd.: Arpan (Moskva) — Materials science news. Science and Technology. Ed.: Tarpan (Moscow), no. 2 (20), 2016, pp. 6 – 12.
3. Bishopp J. Adhesives for aerospace structures. In Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing. William Andrew: Norwich, UK, 2011, pp. 301 – 344. DOI: 10.1016/B978-1-4377-4461-3.10013-6.
4. Kinloch A.J. Adhesives in Engineering, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 1997, vol. 211(5), pp. 307 – 335.
5. BS 7991, 2001, Determination of the mode I adhesive fracture energy, G_{IC}, of structural adhesives using the double cantilever beam (DCB) specimens, British Standard Institution.
6. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, 1976, vol. 6, no. 6, p. 773 – 781, doi:10.1016/0008-8846(76)90007-7.
7. Moslemi M., Khoshravan M. Cohesive zone parameters selection for mode-I prediction of interfacial delamination. Journal of Mechanical Engineering, 2015, vol. 61(9), pp. 507 – 516.
8. Alfano M., Furgiuele F., Pagnotta L., Paulino G.H. Analysis of fracture in aluminum joints bonded with a Bi-component epoxy adhesives. J. of Testing and Evaluation, 2010, vol. 39(2), paper ID JTE102 753.
9. Chen Z., Adams R.D., DaSilva Lucas F.M. Prediction of crack initiation and propagation of adhesive joints using an energy failure criterion. Engineering Fracture Mechanics, 2011, vol. 78, pp. 990 – 1007.
10. Ustinov A.A., Babaevskij P.G., Kozlov N.A., Salienko N.V. Ispol'zovanie modeli kogezionnoj zony i metoda konechnyh elementov dlya analiza treshchinostojkosti kleevyh soedinenij [Using the cohesive zone model and the finite element method to analyze the crack resistance of adhesive joints]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Polymer Science, Series D: Glues and Sealing Materials*, 2019, no. 8, pp. 33 – 38.
11. Turon A., Davila C.G., Camanho P.P., Costa J. An Engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. Engineering Fracture Mechanics, 2007, vol. 74(10), pp. 1665 – 1682.
12. Harper P., Hallett S.R. Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination. Engineering Fracture Mechanics, 2008, vol. 75(16), pp. 4774 – 4792, doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.06.004.
13. Babaevskij P.G., Kozlov N.A., Shubin A.N., Smirnova T.N., Novikov L.S., Chernik V.N. Kinetika dokriticheskogo rosta treshchiny i G-V-diagrammy kleevyh soedinenij pri dlitel'nom vozdejstvii faktorov kosmicheskogo prostranstva [Kinetics of subcritical crack growth and G-V diagrams of adhesive joints under prolonged exposure to space factors]. *Perspektivnye Materialy — Advanced Materials* (in Russ), 2003, no. 2, pp. 17 – 23.
14. Regel' V.R., Slucker A.I., Tomashevskij E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdyh tel* [Kinetic nature of the strength of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 560 p.
15. Gol'dshtejn R.V., Perel'muter M.N. O kinetike formirovaniya i rosta treshchin na granice soedineniya materialov [On the kinetics of the formation and growth of cracks at the interface of the joint of materials]. *Izvestiya RAN, Mekhanika Tverdogo Tela — Mechanics of Solids*, 2012, no. 4, pp. 32 – 49.
16. Babaevskij P.G., Shubin A.N., Wagstaff P.G. Fiziko-mekhanicheskie svojstva i harakter razrusheniya epoksiaminnyh kompozicij, otverzhdennyh v vide plenok, kleevyh prosloek i blochnyh obrazcov [Physico-mechanical properties and the nature of destruction of epoxyamine compositions cured in the form of films, adhesive layers and block samples]. Constructions of composite materials, 1999. no. 4. p. 36 – 47.
17. Barenblatt G.I. Matematicheskaya teoriya ravnovesnyh treshchin, obrazuyushchihsya pri hrupkom razrushenii [Mathematical theory of equilibrium cracks formed during brittle fracture]. *Izvestiya AN SSSR. PMTF — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1961, no. 4, pp. 3 – 56.
18. Lindgaard E., Bak B.L.V., Glud J.A., Sjølund J., Christensen E.T. A user programmed cohesive zone finite element for ANSYS mechanical. Engineering Fracture Mechanics, 2017, vol. 180, pp. 229 – 239.
19. Babaevskiy P.G., Kozlov N.A., Shumov, A.E., Novikov L.S., Shaevich S.K., Golden J.L., Kravchenko M. Results of the Komplast experiment on the long-term exposure of materials specimens on the ISS surface. Advances in Space Research, 2015, v. 56, no. 10, pp. 2188 – 2195.

Статья поступила в редакцию — 1.02.2021 г.
после доработки — 19.03.2021 г.
принята к публикации — 22.03.2021 г.

Устинов Андрей Анатольевич *— Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) — МАИ (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), ассистент кафедры, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов. E-mail: ustinershovskiy@yandex.ru*

Бабаевский Петр Гордеевич *— Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) — МАИ (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов. E-mail: babaevskiypg@mati.ru.*

Козлов Николай Алексеевич *— Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) — МАИ (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), доктор технических наук, доцент, профессор кафедры, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов, методов их исследований. E-mail: mail-kna@mail.ru.*

Салиенко Николай Викторович *— Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) — МАИ (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), кандидат технических наук, доцент, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов. E-mail: intdep@mati.ru.*

Numerical evaluation of subcritical crack growth kinetics in structural adhesive joints under long static loading with cohesive zone model and experimental data

A. A. Ustinov, P. G. Babayevsky, N. A. Kozlov, N. V. Saliyenko

The article proposes a numerical method for modeling and calculating the kinetics of subcritical crack growth and creating kinetic G-V diagrams for structural adhesive joints under prolonged static loading. The load was set by the global subcritical crack opening according to mode I. Modeling and calculations were carried out using a cohesive zone model implanted into the finite element method in the ANSYS software package. The parameters of the cohesive zone law and the kinetics of subcritical crack growth were experimentally determined for samples in the form of a double cantilever beam made of aluminum alloy plates glued with industrial grade epoxy glue. Comparison of the calculated and experimental data showed a good correlation.

Keywords*:* structural adhesive joints, kinetics of subcritical crack growth, long-term static load, specified crack opening, cohesive zone model, finite element method, parameters of the cohesive zone law, kinetic *G – V* diagram.

Ustinov Andrey *— Moscow Aviation Institute (National Research University), (121552, Moscow, ul. Orshanskaya, 3, MAI), assistant of the chair Technologies of composite materials, structures and microsystems, specialist in the field of material science and technology of polymer composites. E-mail: ustinershovskiy@yandex.ru.*

Babayevsky Peter *— Moscow Aviation Institute (National Research University), (121552, Moscow, ul. Orshanskaya, 3, MAI), Dr Sci (Eng), professor, head of the chair Technologies of Composite Materials, Structures and Microsystem", specialist in the field of material science and technology of polymer composites. E-mail: gena@mati.ru.*

Kozlov Nikolay *— Moscow Aviation Institute (National Research University), (121552, Moscow, ul. Orshanskaya, 3, MAI), Dr Sci (Eng), associate professor, professor of the Technologies of composite materials, structures and microsystems, specialist in the field of materials science and technologies of polymer composite materials and methods of their research. E-mail: mail-kna@mail.ru.*

Salienko Nikolay *— Moscow Aviation Institute (National Research University), (121552, Moscow, ul. Orshanskaya, 3, MAI), PhD, associate professor, specialist in the field of material science and technology of polymer composites. E-mail: intdep@mati.ru.*