

УДК 620.179:534.6

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-1(1)-41-47

Антон Хоменко, Олександр Космач

**МОДЕЛЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
У ВИПАДКУ СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ**

Актуальність теми дослідження. Сучасні тенденції розвитку машинобудування ґрунтуються на використанні прогресивних матеріалів, які мають суттєві переваги у порівнянні з традиційними матеріалами. Дослідження характеру руйнування таких матеріалів під дією експлуатаційних навантажень на стадії проектування виробу забезпечує визначення терміну безвідмовної роботи та працездатності механізмів. Тому існує необхідність дослідження кінетики руйнування композиційних матеріалів при зародженні мікроруйнувань, що відповідає активаційному процесу повного руйнування вузла машини.

Постановка проблеми. Дослідження руйнування композиційних матеріалів ґрунтуються на концепціях представлення однорідності структури, багатокомпонентного матеріалу та його фізико-механічних властивостей. Проблема створення математичних моделей, які описують руйнування композиційних матеріалів, а також методів його контролю, наприклад, за ультразвуковими зміцненнями поверхонь, додатково пов'язана з різноманітними математичними апаратами, що описують кінетику руйнування таких матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи концепцію руйнування композиційних матеріалів у вигляді пучка волокон.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження кінетики мікроструктурних руйнувань поверхонь композиційних матеріалів у випадку складного напруженого стану.

Постановка завдання. Підвищення достовірності визначення характеру руйнування композиційних матеріалів у випадку складного напруженого стану ґрунтується на розробці моделі, яка враховує характер зміни напруженого стану мікроелементів, а також зміну кількості незруйнованих мікроелементів у часі до повного руйнування зразка.

Виклад основного матеріалу. Проведені теоретичні дослідження руйнування волокнистого композиційного матеріалу у випадку складного напруженого стану, який відповідає поперечному навантаженню, що дозволяє встановити закономірності його руйнування в часі залежно від факторів, що впливають. Отримані результати моделювання дозволяють оцінити розподіл міцності та живучість композиційного матеріалу на кожній стадії його руйнування.

Висновки відповідно до статті. Розроблена модель руйнування композиційного матеріалу у випадку складного напруженого стану дозволяє оцінити характер руйнування мікроелементів багатокомпонентного матеріалу в часі, а також виявити шляхи підвищення міцності з урахуванням діючих силових навантажень на досліджуваній зразок.

Ключові слова: композиційний матеріал; волокно; форма; навантаження; напруження; міцність; руйнування.

Рис.: 3. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. Розвиток сучасного машинобудування спрямований на використання матеріалів, які мають високу міцність, низьку вагу, малу вартість, а також простоту технологію виготовлення. До таких матеріалів відносять композиційні матеріали різної структури. Такі матеріали мають суттєві переваги в порівнянні з традиційними матеріалами завдяки широкому варіюванню властивостей у межах окремих структурних груп. Дослідження фізико-механічних характеристик та характеру руйнування таких матеріалів під дією експлуатаційних навантажень на стадії проектування технічних систем забезпечує достовірне визначення ресурсу майбутніх деталей та вузлів. Тому актуальним для цієї групи матеріалів є дослідження кінетики руйнування при утворенні мікроруйнувань, що відповідає активаційному процесу повного руйнування зразків.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку проектування машин для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик, машинобудівна галузь має потребу в більш міцних та зносостійких матеріалах. Нині для вирішення цієї задачі в різних галузях техніки широкого застосування набувають композиційні матеріали (КМ). Дослідження міцності на стадії проектування, методи контролю та діагностики таких КМ у процесі експлуатації є різноманітними та потребують окремої уваги. Одним з найперспективніших та малодосліджених є метод акустичної емісії (АЕ). Суть цього методу полягає в дослідженні пружних зміщень, що виникають у КМ у процесі його руйнування. Проблема створення математичних моделей, які описують сигнали АЕ, пов'язана з наявністю різноманітних концепцій руйнування суцільного й багатокомпонентного матеріалу та різноманітних математичних апаратів, що описують кінетику руйнування матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для дослідження процесів руйнування КМ широке застосування знайшла волоконна модель матеріалу, згідно з якою матеріал представляється у вигляді пучка волокон (FBM – fiber bundle model) [1–4]. Ця модель описує руйнування КМ як послідовне руйнування волокон у пучку з подальшим перерозподілом напружень на волокна, що залишилися незруйнованими в процесі навантаження.

Модель руйнування КМ залежить від: розрахункової (силової) схеми цієї моделі (виду навантаження), форми поперечного перерізу волокон елементарних об'ємів (прямокутні, трикутні круглі і т. ін.), а також хімічної структури та однорідності КМ.

Модель міцності КМ може бути представлена за методиками загальних інженерних підходів, та кінчено-елементного аналізу, що дозволить отримати багатофакторну модель руйнування. У такому випадку розглядають розподіл напружень не лише як функції, викликані зовнішнім навантаженням, а як такі, що можуть викликати додаткове навантаження без будь-яких фізичних дій на об'єкт.

Тобто зовнішнє навантаження, що прикладене до об'єкта в одному напрямку, через неможливість деформації системи (введене додаткове геометричне обмеження) викликає в об'єкті додаткові напруження, що спричиняє статичну невизначеність системи.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Сучасні математичні моделі, що описують процес руйнування КМ, спираються на стохастичність явищ, що виникають у процесі руйнування елементів. Грунтуючись на рівнозначності процесів руйнування КМ від різного виду напружень, такі математичні моделі неповною мірою правильно описують фізичну сутність процесу руйнування. Також цим моделям притаманна ідеалізація матеріалу, форми, розташування волокон та наповнювача КМ тощо. Це призводить до виникнення суттєвих похибок розрахунку та значно ускладнює обґрунтований вибір параметрів КМ (коефіцієнта запасу міцності, модуля пружності одичного волокна і наповнювача, коефіцієнта концентрації волокон та ін.).

З цього погляду актуальним є розробка моделі руйнування КМ, яка враховує характер зміни напруженого стану елементів, а також враховує зміну кількості незруйнованих волокон у часі до повного руйнування. У такому випадку модель руйнування КМ повинна враховувати як зовнішні силові чинники, так і геометричні характеристики елементів КМ та їх фізико-механічні характеристики на рівні структури матеріалу.

Постановка завдання. Метою статті є моделювання та аналіз процесу руйнування КМ, який розглядається у вигляді пучка волокон, для складного напруженого стану навантаженого зразка під дією поперечної сили.

Виклад основного матеріалу. У випадку використання волокнистої моделі руйнування КМ при поперечному навантаженні, суцільний об'єм матеріалу можна представити у вигляді деякої визначеної кількості волокон, які розташовуються на однаковій відстані одне від одного та мають однакові фізико-механічні властивості (рис. 1, а). Модель руйнування одного волокна з застосуванням методик кінчено-елементного аналізу дає можливість описати загальну міцність КМ у часі. Наприклад, у найпростішому випадку таку модель можна представити як волокно квадратного поперечного перерізу, яке защемлене з обох боків жорсткими опорами та навантажене поперечними силами ω , які викликають його згин (рис. 1, б).

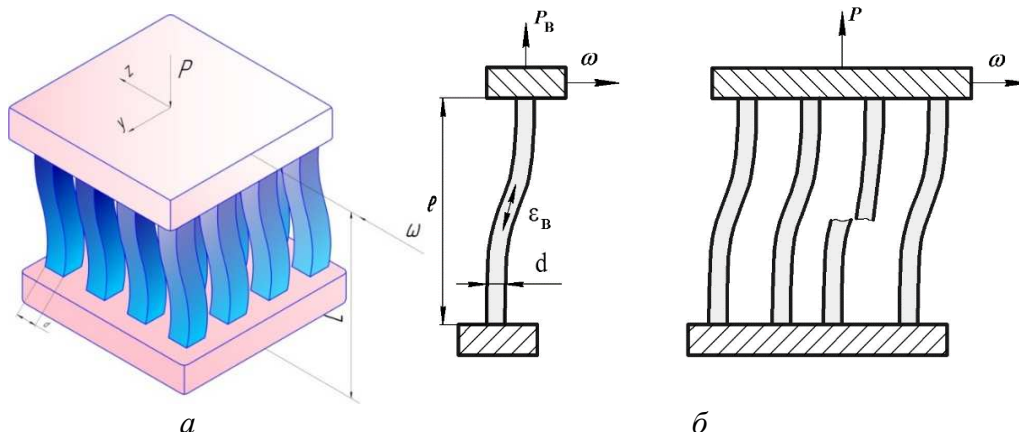


Рис. 1. Представлення однорідного композиційного матеріалу у вигляді сукупності волокон (а) та розрахункова схема навантаження одного волокна та групи волокон згідно з моделлю (б):

P – поздовжня або розтягуюча сила; d – геометричні розміри одного елемента; l – відстань між закріпленими нерухомими блоками; ω – поперечне зусилля; L – загальна довжина одного волокна

Розроблена модель руйнування КМ враховує розрахункову схему, розподіл напружень у системі, характер деформування, а також фізико-механічні характеристики волокон та наповнювача (рис. 2).

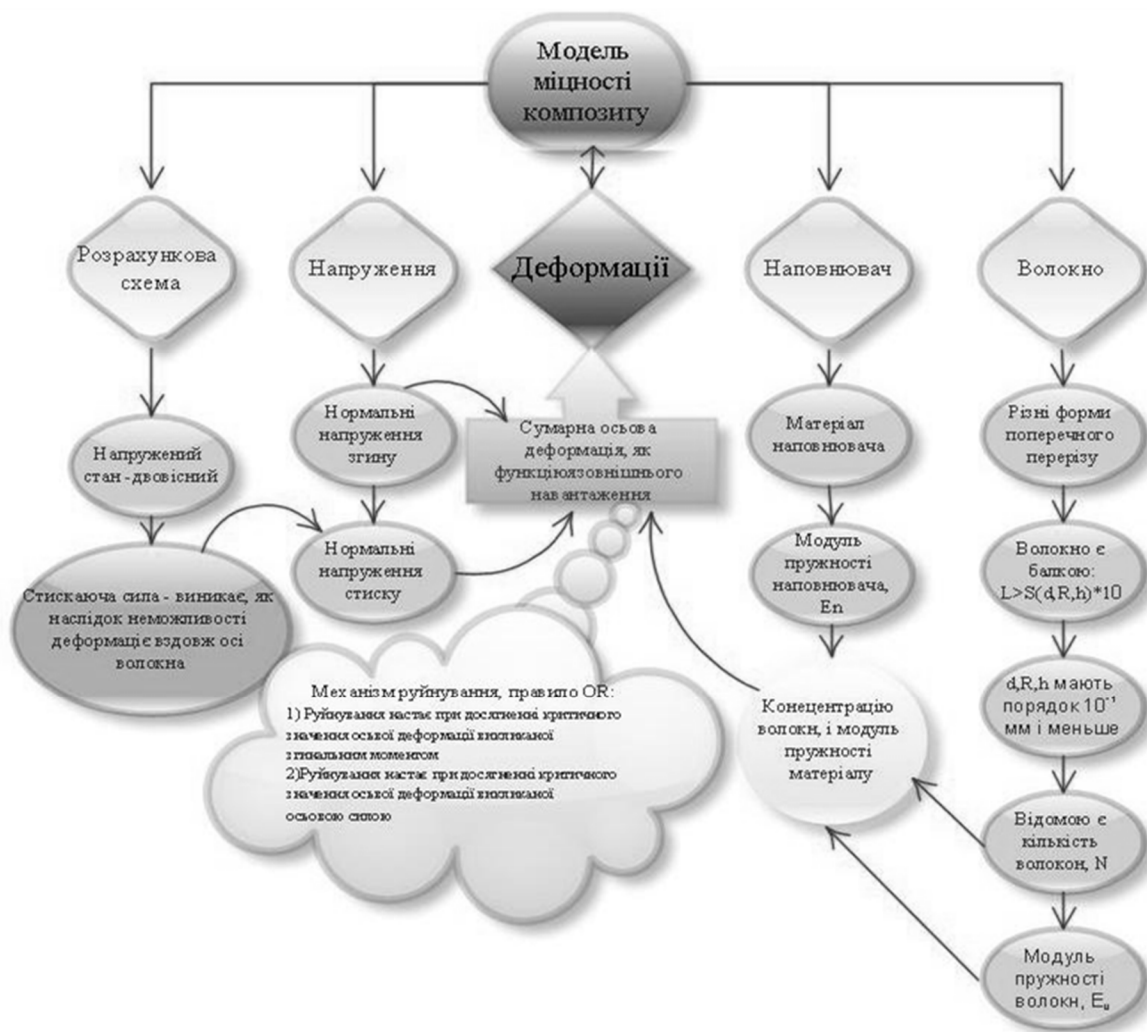


Рис. 2. Аспекти моделі руйнування композиційного матеріалу

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За такої схеми навантаження та закріплення в опорах виникатимуть реакції (сили та моменти сил), від яких також по довжині волокна виникатимуть нормальні напруження.

Математична модель руйнування КМ враховує таке:

- розрахункову схему (схему навантаження) дослідного зразка;
- форму поперечного перерізу волокон (прямокутна, кругла, шестикутна та ін.);
- механічні властивості волокон та наповнювача;
- схильність КМ до пластичного та крихкого руйнування волокон та наповнювача;
- концентрацію волокон у структурі КМ;
- ймовірності руйнування від різного роду напружень.

Модель враховує будь-яку, довільну форму поперечного перерізу волокна, однак припускає, що всі волокна мають однакову форму, та сталі розташування відносно центральних осей загального перерізу матеріалу.

Фізична частина моделі будується на основі розрахункової схеми одного волокна (рис. 1, б), що залишається незруйнованим, поки навантаження не стане критичним та не призведе до початку необоротного руйнування [5].

Інша частина математичної моделі опису процес руйнування матеріалу після повного руйнування першого волокна та враховує ймовірності руйнування кожного наступного волокна від напружень різного роду.

Згідно з розробленою моделлю залежність зміни напружень у часі до початку руйнування описується рівнянням виду:

$$\sigma = (\varepsilon_0 + k \cdot t) \cdot \left(E_v \cdot \left(\frac{S_v \cdot N}{S_{vn}} \right) \right) + \left(1 - \left(\frac{S_v \cdot N}{S_{vn}} \right) \cdot E_n \right) \cdot (1 - E_v \cdot S_v \cdot (\varepsilon_0 + k \cdot t)) \cdot \left(1 - \frac{E_v \cdot I_v \cdot \sqrt{60} \cdot \sqrt{(\varepsilon_0 + k \cdot t)}}{L} \right),$$

де, ε_0 – початкова осьова деформація системи; k – коефіцієнт навантаження; t – час; E_v – модуль пружності волокна; S_v – площа поперечного перерізу волокна; N – початкова кількість волокон; S_{vn} – загальна площа перерізу; E_n – модуль пружності наповнювача; I_v – момент інерції перерізу волокна; L – довжина волокна.

Кількість незруйнованих волокон N_{int} , в певний момент часу описує функція:

$$N_{\text{int}} = N \cdot e^{-V_0 \cdot \int_{t_0}^t e^{r \cdot (\sigma(t, k, \varepsilon_0, E_v, E_n, S_v, S_{vn}, N, I_v, L) - \sigma(t_0, k, \varepsilon_0, E_v, E_n, S_v, S_{vn}, N, I_v, L))} dt}$$

де t_0 – час початку руйнування; V_0 та r – параметри фізико-механічних властивостей КМ.

Напруження σ_{int} , що виникає у КМ у процесі його руйнування, описується виразом виду:

$$\sigma_{\text{int}} = \frac{N}{N_{\text{int}}} \cdot \sigma_{\text{adm}},$$

де σ_{adm} – критичне напруження руйнування.

Залежність кількості незруйнованих елементів КМ (рис. 3, а), а також зміна напружень у процесі руйнування (рис. 3, б) у часі проілюстровані для умовного матеріалу, який складається з 50 волокон. Параметри моделі відповідають схильності матеріалу до крихкого руйнування та має не високу нерівномірність фізико-механічних властивостей. Навантаження КМ було неперервним та лінійно зростаючим з визначеною постійною швидкістю.

Результати моделювання показують, що руйнування елементів КМ має релаксаційний характер падіння. При цьому руйнування елементів КМ характеризується двома стадіями, які характеризуються різною швидкістю. Перша стадія (рис. 3, а) руйнування має дуже низьку швидкість та характеризується поступовим зростанням напруження. Слід зазначити, що на рис. 3 представлені результати з часовим проміжком від початку руйнування першого елемента КМ, а початок навантаження зразка КМ починався з нульової відмітки часу.

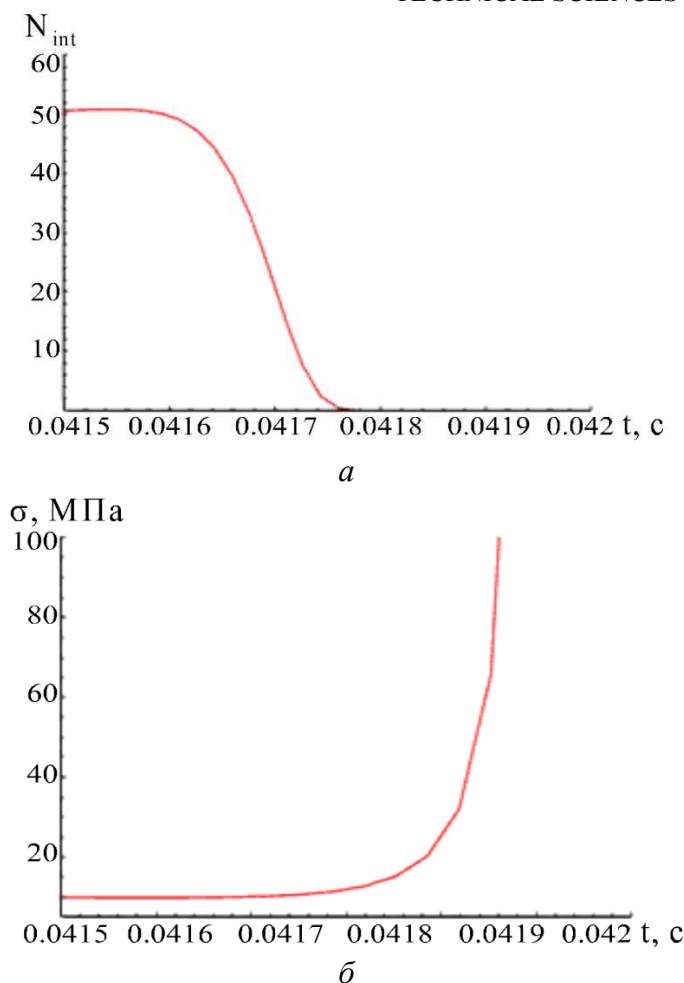


Рис. 3. Закономірності зміни незруйнованих волокон у часі (а), а також закономірності зміни напружень (б) при руйнуванні композиційного матеріалу поперечною силою

З результатів моделювання також видно, що друга стадія руйнування КМ характеризується високою швидкістю, причому їй відповідає різке зростання напруження в часі (рис. 3, б).

Тривалість часу руйнування елементів КМ дуже мала, що відповідає характеру руйнуванню крихких матеріалів. Так, наприклад, відношення часу повного руйнування КМ до часу навантаження зразка матеріалу становить величину близьку 10^{-3} .

Висновки відповідно до статті. Розроблена модель руйнування КМ, яка враховує зміну кількості залишених елементів у часі. КМ у такому випадку представлено у вигляді пучка волокон при протіканні процесу руйнування елементів в умовах дії поперечного навантаження.

Показано, що при розвитку руйнування волокон КМ крива зміни кількості залишених елементів має неперервний характер падіння. Неперервність процесу руйнування супроводжується неперервністю зростання напруження на елементах КМ.

Руйнування КМ характеризується двома стадіями руйнування, які мають різну швидкість. Загальне руйнування КМ має релаксаційних характер падіння. Аналіз результатів моделювання за умови постійності навантаження показав таке: зі зменшенням кількості незруйнованих елементів КМ відбувається нелінійне зростання напруження в часі, а також швидке протікання самого процесу.

Отримані результати моделювання узгоджуються з існуючими уявленнями про руйнування крихких матеріалів.

Особливий інтерес становить дослідження характеру руйнування елементів КМ при зміні геометричних мікроструктурних показників матеріалу, а також його фізико-механічних характеристик.

Список використаних джерел

1. *Shcherbakov R.* On modeling of geophysical problems :a dissertation for degree of doctor of philosophy / Robert Shcherbakov. – Cornell university, 2002. – 209 p.
2. *Kun F.* Damage in fiber bundle models / F. Kun, S. Zapperi, H. J. Herrmann // *Eur. Phys. J. B.* – 2000. – Vol. 17, No 2. – P. 269–279.
3. *Kun F.* Damage development under gradual loading of composites / F. Kun, H. J. Herrmann // *Journal of Materials Science.* – 2000. – P. 35.
4. *Raischel F.* Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder / F. Raischel, F. Kun, H. J. Herrmann // *Phys. Rev. E.* – 2006. – Vol. 74 (2), № 3. – P. 4.
5. *Модель сигнала акустической эмиссии при разрушении композиционного материала под действием поперечной силы / С. Ф. Филоненко, В. М. Калита, А. П. Космач, Т. Н. Косицкая // Технологические системы.* – 2010. – № 2 (51). – С. 45–53.

References

1. Shcherbakov, R. (2002). *On modeling of geophysical problems :a dissertation for degree of doctor of philosophy.* Cornell university [in English].
2. Kun, F., Zapperi, S. & Herrmann, H. J. (2000). Damage in fiber bundle models. *European Physical Journal*, 2 (17), 269–279 [in English].
3. Kun, F. & Herrmann, H. J. (2000). *Damage development under gradual loading of composites.* Journal of Materials Science (pp. 35) [in English].
4. Raischel, F., Kun, F. & Herrmann, H. J. (2006). Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder. *Physical Rev E*, 74 (2), 3, 4 [in English].
5. Filonenko, S., Kalyta, V., Kosmach, A. & Kosytska, T. (2010). Model signala akusticheskoi emissii pri razrushenii kompozitsionnogo materiala pod deistviem poperechnoi sily [The model of the acoustic emission signal at fracture of the composite material under the action of transverse force]. *Tekhnologicheskie sistemy – Technological systems*, 2 (51), 45–53 [in English].

UDC 620.179:534.6

Anton Khomenko, Aleksandr Kosmach

SIMULATION OF DESTRUCTION OF COMPOSITE MATERIALS IN CASE OF COMPLEX STRENGTH CONDITION

Urgency of the research. Modern trends in the development of mechanical engineering, based on the usage of advanced materials, which have significant advantages over traditional materials. Study of the destruction nature of such materials under the influence of operational loads at the design stage of the product ensures the determination of the period of failure-free operation and the working capacity of the mechanisms. Therefore, there is a need to study the kinetics of fracture of composite materials in the initiation of microfractures, which corresponds to the activation process of complete destruction of the machine assembly.

Target setting. Investigation of the destruction of composite materials is based on the concepts of the representation of the homogeneity of the structure, the multicomponent material and its physico-mechanical properties. The problem of creating of mathematical models, which describe the destruction of composite materials, as well as methods of its control, for example, ultrasonic displacements of surfaces, is additionally associated with various mathematical apparatus, describing the kinetics of the destruction of such materials.

Actual scientific researches and issues analysis. We were considered the latest publications with publicly available, including the concept of fracture of composite materials in the form of a fiber bundle.

Uninvestigated parts of general matters defining. Study of the kinetics of microstructural destruction of composite materials surfaces in the case of a complex stress state.

The research objective. The increase in the reliability of the determination of the fracture nature of composite materials in the case of a complex stress state is based on the development of a model that takes into account the nature of the stress state of microelements, as well as the change in the amount of intact microelements in time until the sample is completely destroyed.

The statement of basic materials. Theoretical study of the destruction of fibrous composite material in the case of a complex stressed state that corresponds to the transverse loading, which allows establishing the laws of its destruction in time, depending on the influence factors was conducted. Were obtained simulation results that allow estimating the distribution of strength and durability of composite material at each stage of its destruction.

Conclusions. The developed model of destruction of composite material in the case of a complex stress state allows to estimate the nature of the destruction of the elements of multicomponent material in time, as well as to identify ways to increase strength, taking into consideration the current force loads on the sample.

Keywords: composite material; fiber; shape; gravity; pressure; strength; destruction.

Fig.: 3. References: 5.

УДК 620.179:534.6

Антон Хоменко, Александр Космач

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В СЛУЧАЕ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Актуальность темы исследования. Современные тенденции развития машиностроения, основанные на использовании прогрессивных материалов, которые имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными материалами. Исследование характера разрушения таких материалов под действием эксплуатационных нагрузок на стадии проектирования изделия обеспечивает определение срока безотказной работы и работоспособности механизмов. Поэтому существует необходимость исследования кинетики разрушения композиционных материалов при зарождении микроразрушений, что соответствует активационному процессу полного разрушения узла машины.

Постановка проблемы. Исследование разрушения композиционных материалов основано на концепциях представления однородности структуры, многокомпонентного материала и его физико-механических свойств. Проблема создания математических моделей, описывающих разрушения композиционных материалов, а также методов его контроля, например, ультразвуковыми смещениями поверхностей, дополнительно связана с различным математическим аппаратом, описывающим кинетику разрушения таких материалов.

Анализ последних исследований и публикаций. Были рассмотрены последние публикации в открытом доступе, включая концепцию разрушения композиционных материалов в виде пучка волокон.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Исследование кинетики микроструктурных разрушений поверхностей композиционных материалов в случае сложного напряженного состояния.

Постановка задачи. Повышение достоверности определения характера разрушения композиционных материалов в случае сложного напряженного состояния основано на разработке модели, учитывающей характер изменения напряженного состояния микроэлементов, а также изменение количества неповрежденных микроэлементов во времени до полного разрушения образца.

Изложение основного материала. Проведены теоретические исследования разрушения волокнистого композиционного материала в случае сложного напряженного состояния, который соответствует поперечной нагрузке, позволяет установить закономерности его разрушения во времени в зависимости от влияющих факторов. Полученные результаты моделирования позволяют оценить распределение прочности и живучесть композиционного материала на каждой стадии его разрушения.

Выводы в соответствии со статьей. Разработанная модель разрушения композиционного материала в случае сложного напряженного состояния позволяет оценить характер разрушения микроэлементов многокомпонентного материала во времени, а также выявить пути повышения прочности с учетом действующих силовых нагрузок на исследуемый образец.

Ключевые слова: композиционный материал; волокно; форма; нагрузка; напряжение; прочность; разрушение.

Рис.: 3. Библ.: 5.

Космач Александр Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий машиностроения та деревообработки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Космач Александр Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий машиностроения и деревообработки, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Kosmach Aleksandr – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Technologies of Mechanical Engineering and Woodworking Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: alexkos86@gmail.com

Хоменко Антон Сергійович – магістрант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Хоменко Антон Сергеевич – магістрант, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

Khomenko Anton – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: toshaproxx@gmail.com