

ДЕГРАДАЦИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

П.В. Акулин¹

plus-orange@yandex.ru

Ф.А. Насонов^{1,2}

nasonovf2006@mail.ru

¹ ОКБ Сухого ПАО «ОАК», Москва, Российская Федерация

² МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследована ресурсная прочность композиционного материала. Вопросы ресурсной прочности в настоящее время актуальны, поскольку большинство существующих математических моделей, описывающих деградацию свойств композиционного материала при многоцикловом нагружении, эмпирические. Для расчета ресурсной прочности композиционных материалов необходим широкий базис натуральных экспериментов. Выполнен эксперимент консольного изгиба пластины из слоистого композиционного материала с жестким нагружением свободного торца. Общее число циклов нагружения образца составило 768 000. Образец армирован однонаправленным углепластиком и плетеным органопластиком, имеет сложную схему укладки слоев со сбегом по длине. В процессе испытаний установлено снижение жесткостных свойств пакета слоев композиционного материала в зависимости от числа циклов нагружения. Уменьшение жесткости свидетельствует о зарождении и распространении трещин в матрице композиционного материала, что приводит к снижению предельных физических характеристик и, как следствие, может вызвать преждевременное разрушение образца. Полученные результаты позволяют расширить базис натуральных многоцикловых испытаний композиционного материала, подверженного изгибному нагружению

Ключевые слова

Композиционные материалы, ресурсная прочность, деградация жесткостных и прочностных свойств, накопление повреждений в матрице, слоистые композиционные материалы

Поступила 16.01.2024

Принята 15.04.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. Конструкция планера самолета имеет жесткие ограничения по массе и прочности, в связи с этим при проектировании силовой конструкции летательного аппарата часто используют композиционные материалы (КМ). Такие материалы имеют высокие предельные характеристики и низкую плотность по сравнению с металлическими сплавами.

При проектировании конструкций из КМ следует учитывать, что в процессе эксплуатации конструкции происходит деградация жесткостных и прочностных свойств материала. Уменьшение жесткости и прочности, связанное с возникновением и распространением поперечных трещин в матрице КМ, рассмотрено в [1–10]. Деградация таких материалов напрямую зависит от качества формования образцов. Результаты исследования влияния дефектов структуры на прочность КМ приведены в [11–16]. Согласно изложенному, ресурсная прочность КМ является сложным микропроцессом, на который влияет множество различных факторов. В связи с этим существующие математические модели [17–22], описывающие деградацию КМ, требуют большого числа натуральных испытаний.

В большинстве работ, посвященных деградации КМ, рассматривается плосконапряженное состояние образцов.

Цель настоящей работы — исследование деградации свойств КМ со сложной внутренней структурой при многоцикловом изгибном нагружении.

Объект испытания. Рассмотрим образец, армированный однонаправленным углеродным волокном и тканым органопластиком, с параметрами армирования, приведенными в табл. 1. Пакет слоев КМ имеет переменную толщину сечения за счет обрезания слоев с шагом 5 мм. Общие размеры сечения исследуемого образца приведены на рис. 1, физические свойства монослоев углерода и органопластика — в табл. 2.

Таблица 1

Параметры армирования исследуемого образца

Номер слоя	Угол укладки, град	Материал	Номер слоя	Угол укладки, град	Материал	Номер слоя	Угол укладки, град	Материал
1	0	О	9	0	О	17	0	О
2	0	У	10	90		18	-45	
3	45	О	11	45		19	45	
4	-45		12	-45		20	90	
			13	90		21	0	
5	0		14	-45		22	-45	
6	90		15	45	23	45		
7	45		16	90	24	0	У	
8	-45		О			25	0	О

Примечание. О — органопластик, У — углепластик.

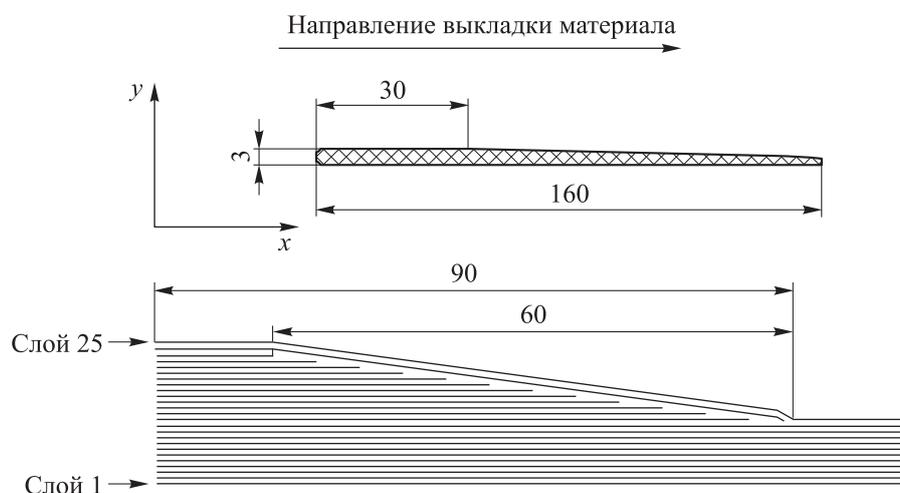


Рис. 1. Общие размеры сечения исследуемого образца

Таблица 2

Физические свойства монослоев углерода и органопластика

Материал	E_1 , МПа	E_2 , МПа	G_{12} , МПа	μ_{12}	Толщина монослоя, мм
О	32 000	32 000	12 000	0,12	0,12
У	120 000	8700	9700	0,3	0,14

Порядок проведения испытаний. Объем ресурсных испытаний показан на рис. 2. Образцы нагружались циклическими перемещениями y с суммарным числом циклов $n = 768\,000$. Первую половину циклов исследуемый образец нагружался перемещением $y = 10$ мм, вторую половину — перемещением $y = 20,5$ мм. На испытательном стенде смоделировано нагружение конструктивных элементов, образующих замкнутый аэродинамический контур между крылом и механизацией крыла на всех режимах полета. Испытания проводились с частотой 0,5 Гц. На контактные поверхности исследуемого образца и клина нанесено антифрикционное покрытие из органопластика, что позволило предотвратить изнашивание пакета слоев КМ от действующего кулоновского трения. Влияние температурных деформаций, возникающих от действия кулоновского трения, на полученные результаты пренебрежимо мало.

Образцы нагружались перемещением клина. Схема испытательного стенда для консольного изгиба приведена на рис. 3.

В процессе испытаний силу, действующую на образец и необходимую для его нагружения заданным перемещением, измеряли через каждые

192 000 циклов. Скорость подвижной траверсы разрывной машины в ходе измерения действующей силы составляла 0,25 мм/с. Разрывная машина имеет погрешность измерения действующей силы в пределах 1 %. На основании изменения силы, прикладываемой к клину, рассчитывалась деградация жесткости пакета слоев КМ.

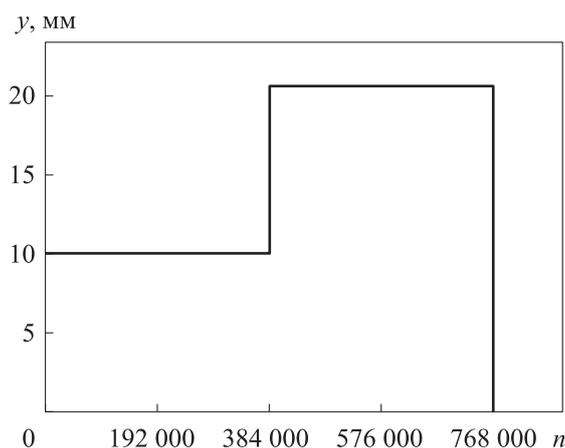


Рис. 2. Объем ресурсных испытаний

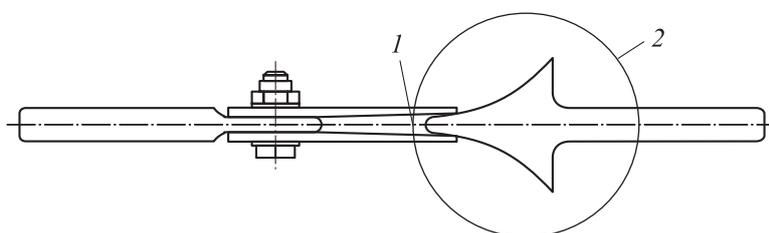


Рис. 3. Схема испытательного стенда для консольного изгиба:

1 — образец из КМ; 2 — клин

Результаты испытаний. Проведена полиномиальная аппроксимация массива данных, полученных в процессе испытаний. Зависимость силы F , прикладываемой к клину, от перемещения y образцов приведена на рис. 4. При увеличении числа циклов нагружения уменьшается значение силы, необходимой для проталкивания клина на заданную глубину. На основании этого можно сделать вывод, что происходит деградация жесткостных свойств пакета слоев КМ.

Зависимость деградации жесткости пакета слоев КМ от числа циклов нагружения приведена на рис. 5. Здесь $d = (F_{n+1}/y)/(F_{n=0}/y)$ — отношение тангенсов углов (см. рис. 4).

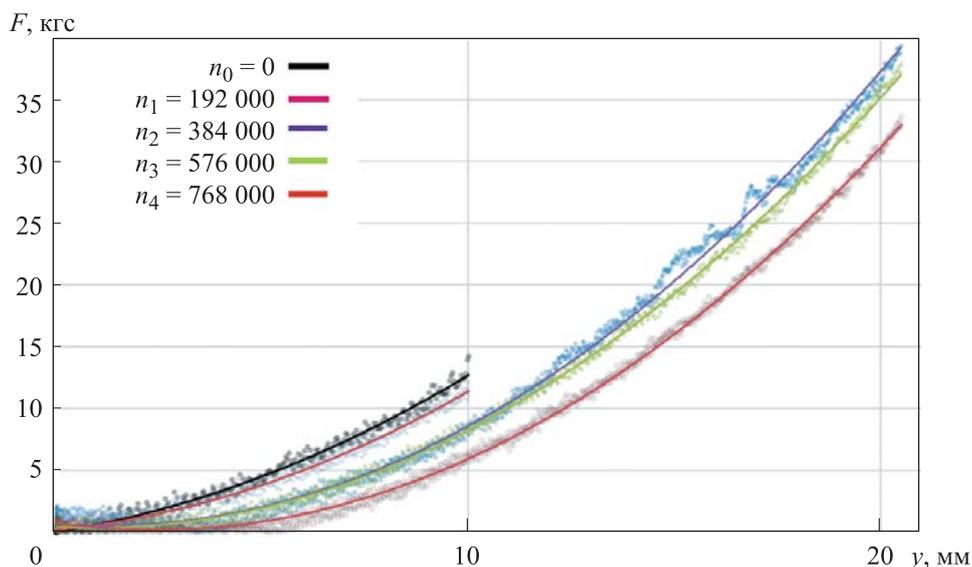


Рис. 4. Зависимость силы, прикладываемой к клину, от перемещения исследуемых образцов при разных числах циклов нагружения

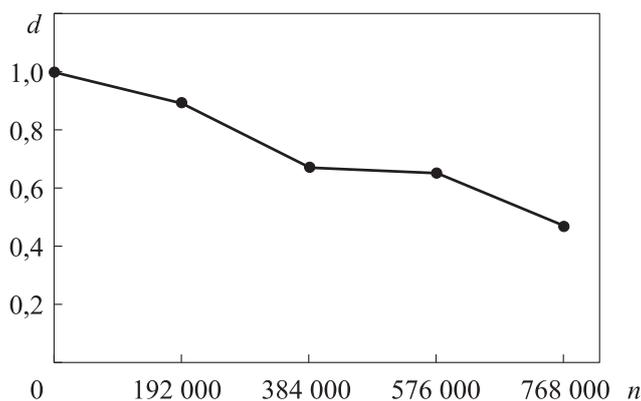


Рис. 5. Зависимость деградации жесткости пакета слоев КМ от числа циклов нагружения

Вывод. Приведены результаты ресурсных испытаний на консольный изгиб конструктивно подобного образца. На основании полученных данных выполнен расчет жесткости пакета слоев КМ в зависимости от числа циклов нагружения. Результаты расчета указывают на уменьшение жесткости пакета слоев и деградацию структуры КМ, что определяет работоспособность образца с учетом его контактного взаимодействия с другими деталями.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рейфснейдер К. Повреждение конструкций из композитов в процессе эксплуатации. В кн.: *Прикладная механика композитов*. М., Мир, 1989, с. 108–142.
- [2] Кривородов В.С., Лексовский А.М. Энергоемкость процесса разрушения и прочность композиционных материалов. *Механика композитных материалов*, 1987, № 6, с. 999–1006.
- [3] Highsmith A.L., Reifsnider K.L. Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates. In: *Damage in composite materials: basic mechanisms, accumulation, tolerance and characterization*. Philadelphia, ASTM, 1982, pp. 103–117.
DOI: <https://doi.org/10.1520/STP34323S>
- [4] Jonson W.S. *Mechanisms of fatigue damage in boron/aluminum composites*. Technical Memorandum NASA-TM-81926. Washington, NASA, 1980.
- [5] Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. Киев, Наукова думка, 1985.
- [6] Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига, Зинатне, 1980.
- [7] Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. Минск, БГУ им. В.И. Ленина, 1978.
- [8] Канаун С.К., Чудновский А.И. О квазихрупком разрушении. *Механика твердого тела*, 1970, № 3, с. 185–186.
- [9] Киялбаев Д.А., Чудновский А.И. О разрушении деформируемых тел. *ПМТФ*, 1970, № 3, с. 105–110.
- [10] Мовчан А.А. Проблема прочности тонкостенных конструкций. В кн.: *Вопросы прочности тонкостенных авиационных конструкций*. М., МАИ, 1989, с. 20–24.
- [11] Centea T., Grunenfelder L., Nutt S. A review of out-of-autoclave prepregs — material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Compos. Part A Appl. Sc. Manuf.*, 2015, no. 70, pp. 132–154.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.029>
- [12] Patel N., Rohatgi V., Lee L.J. Micro-scale flow behavior, fiber wetting and void formation in liquid composite molding. *Polymer Engineering and Science*, 1995, vol. 35, no. 10, pp. 837–851. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.760351006>
- [13] Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. *Контроль. Диагностика*, 2007, № 4, с. 23–32.
EDN: HZQACJ
- [14] Сапожников С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков. Челябинск, ЧГТУ, 1994.
- [15] Senthil K., Arockiarajan A., Palaninathan R., et al. Defects in composite structures: its effects and prediction methods — a comprehensive review. *Compos. Struct.*, 2013, vol. 106, pp. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.008>

- [16] Бохоева Л.А. Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами. Улан-Удэ, Изд-во ВСГТУ, 2007.
- [17] Luat D.C., Lurie S.A., Dudchenko A.A. Modeling of degradation of the composite properties on cracking and delamination when subjected to static and cycling loading. *Compos.: Mech. Comput. Appl.: Int. J.*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 315–331. DOI: <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v1.i4.20>
- [18] Дудченко А.А., Лурье С.А. Моделирование процессов роста поврежденности и деградации механических свойств слоистых композитов. М., Изд-во МАИ, 2019.
- [19] Dudchenko A.A., Lurie S.A., Halim K. Multiscale modeling on damage mechanics of laminated composite materials. *Proc. Conf. on Damage in Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Testing*, 2006, pp. 23–26.
- [20] Lurie S.A. On the entropy damage accumulation model of composite materials. *Proc. Workshop on Computer Synthesis Structure and Properties of Advanced Composites*, 1994, pp. 6–18.
- [21] Soborejo A.-B.-O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials at high temperatures. *Proc. Int. Conf. on Strength of Metals and Alloys*, 1967, pp. 252–256.
- [22] Мовчан А.А. Микромеханический подход к проблеме описания накопления анизотропного рассеянного урона. *Механика твердого тела*, 1990, № 3, с. 115–123.

Акулин Петр Владимирович — инженер-конструктор НИО-6 ОКБ Сухого ПАО «ОАК» (Российская Федерация, 125284, Москва, ул. Поликарпова, д. 23А).

Насонов Федор Андреевич — канд. техн. наук, руководитель НТС Совета МС, ведущий технолог 3-го класса отдела ПКМ НИО материалов и технологий ОКБ Сухого ПАО «ОАК» (Российская Федерация, 125284, Москва, ул. Поликарпова, д. 23А); доцент кафедры «Технология композиционных материалов конструкции и микросистем» МАИ, доцент кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Акулин П.В., Насонов Ф.А. Деградация свойств композиционного материала при многоцикловом нагружении. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 1 (152), с. 4–13. EDN: UXYWYU

COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES DEGRADATION UNDER THE MULTI-CYCLE LOADING

P.V. Akulin¹

plus-orange@yandex.ru

F.A. Nasonov^{1,2}

nasonovf2006@mail.ru

¹ Sukhoi Design Bureau, PJSC “UAC”, Moscow, Russian Federation

² Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper studies endurance strength of the composite material. The problem is relevant because most existing mathematical models describing the composite material properties degradation under the multi-cycle loading are empirical. A broad basis for the full-scale experiments is required to compute the composite material endurance strength. A full-scale experiment of the cantilever bending of a plate made of the layered composite material with the free end rigid loading was conducted. The total number of the sample loading cycles was 768,000. The sample was reinforced with the unidirectional carbon fiber and woven organoplastics, and had a complex laying pattern with the layers tapering along the sample length. During testing, a decrease in strength properties of the composite material layer package with the number of loading cycles was established. A decrease in stiffness indicated appearance and propagation of cracks in the material matrix leading to a decrease in the composite material ultimate physical characteristics and, as a consequence, could cause the premature structure failure. The obtained results make it possible to expand the basis for full-scale multi-cycle testing of the composite material subjected to the bending loading

Keywords

Composite materials, resource strength, rigidity and strength properties degradation, damage accumulation in the matrix, layered composite materials

Received 16.01.2024

Accepted 15.04.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Reyfsnayder K. Povrezhdenie konstruktsiy iz kompozitov v protsesse ekspluatatsii [Damage to composite structures during operation]. V kn.: *Prikladnaya mekhanika kompozitov* [In: Applied mechanics of composites]. Moscow, Mir, 1989, pp. 108–142 (in Russ.).
- [2] Krivorodov B.C., Leksovskiy A.M. Energy intensity of the fracture process and strength of composite materials. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1987, no. 6, pp. 999–1006 (in Russ.).

- [3] Highsmith A.L., Reifsnider K.L. Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates. In: *Damage in composite materials: basic mechanisms, accumulation, tolerance and characterization*. Philadelphia, ASTM, 1982, pp. 103–117.
DOI: <https://doi.org/10.1520/STP34323S>
- [4] Jonson W.S. Mechanisms of fatigue damage in boron/aluminum composites. Technical Memorandum NASA-TM-81926. Washington, NASA, 1980.
- [5] Vanin G.A. Mikromekhanika kompozitsionnykh materialov [Micromechanics of composite materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985.
- [6] Malmeyer A.K., Tamuzh V.P., Teters G.A. Soprotivlenie polimernykh i kompozitnykh materialov [Resistance of polymer and composite materials]. Riga, Zinatne Publ., 1980.
- [7] Volkov S.D., Stavrov V.P. Statisticheskaya mekhanika kompozitnykh materialov [Statistical mechanics of composite materials]. Minsk, BGU im. V.I. Lenina, 1978.
- [8] Kanaun S.K., Chudnovskiy A.I. On quasi-brittle fracture. *Mekhanika tverdogo tela*, 1970, no. 3, pp. 185–186 (in Russ.).
- [9] Kiyalbaev D.A., Chudnovskiy A.I. Failure of solids under strain. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1970, vol. 11, no. 3, pp. 453–457. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00908076>
- [10] Movchan A.A. Problema prochnosti tonkostennykh konstruksiy [Strength problems of thin-walled structures]. V kn.: *Voprosy prochnosti tonkostennykh aviatsionnykh konstruksiy* [In: Strength problems of thin-walled aircraft structures]. Moscow, MAI Publ., 1989, pp. 20–24 (in Russ.).
- [11] Centea T., Grunenfelder L., Nutt S. A review of out-of-autoclave prepregs — material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Compos. Part A Appl. Sc. Manuf.*, 2015, no. 70, pp. 132–154.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.029>
- [12] Patel N., Rohatgi V., Lee L.J. Micro-scale flow behavior, fiber wetting and void formation in liquid composite molding. *Polymer Engineering and Science*, 1995, vol. 35, no. 10, pp. 837–851. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.760351006>
- [13] Murashov V.V., Rummyantsev A.F. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods of their detection. Part 1. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials. *Kontrol. Diagnostika*, 2007, no. 4, pp. 23–32 (in Russ.). EDN: HZQACJ
- [14] Sapozhnikov C.B. Defekty i prochnost armirovannykh plastikov [Defects and strength of reinforced plastics]. Chelyabinsk, ChGTU Publ., 1994.
- [15] Senthil K., Arockiarajan A., Palaninathan R., et al. Defects in composite structures: its effects and prediction methods — a comprehensive review. *Compos. Struct.*, 2013, vol. 106, pp. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.008>
- [16] Bokhoeva L.A. Osobennosti rascheta na prochnost elementov konstruksiy iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami [Features of calculating the strength of structural elements made of isotropic and composite materials with acceptable defects]. Ulan-Ude, VSGTU Publ., 2007.

[17] Luat D.C., Lurie S.A., Dudchenko A.A. Modeling of degradation of the composite properties on cracking and delamination when subjected to static and cycling loading. *Compos.: Mech. Comput. Appl.: Int. J.*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 315–331.

DOI: <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v1.i4.20>

[18] Dudchenko A.A., Lurye S.A. Modelirovanie protsessov rosta povrezhdennosti i degradatsii mekhanicheskikh svoystv sloistykh kompozitov [Modeling of the processes of damage growth and degradation of mechanical properties of layered composites]. Moscow, MAI Publ., 2019.

[19] Dudchenko A.A., Lurie S.A., Halim K. Multiscale modeling on damage mechanics of laminated composite materials. *Proc. Conf. on Damage in Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Testing*, 2006, pp. 23–26.

[20] Lurie S.A. On the entropy damage accumulation model of composite materials. *Proc. Workshop on Computer Synthesis Structure and Properties of Advanced Composites*, 1994, pp. 6–18.

[21] Soborejo A.-B.-O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials at high temperatures. *Proc. Int. Conf. on Strength of Metals and Alloys*, 1967, pp. 252–256.

[22] Movchan A.A. A micromechanical approach to the problem of describing the accumulation of anisotropic scattered damage. *Mekhanika tverdogo tela*, 1990, no. 3, pp. 115–123 (in Russ.).

Akulin P.V. — Design Engineer, OSR-6, Sukhoi Design Bureau, PJSC “UAC” (Polikarpova ul. 23A, Moscow, 125284 Russian Federation).

Nasonov F.A. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Scientific and Technical Sector, Council YS, Leading Technologist of 3rd class, Department of Materials and Technologies, Sukhoi Design Bureau, PJSC “UAC” (Polikarpova ul. 23A, Moscow, 125993 Russian Federation); Assoc. Professor, Department of Composite Materials, Constructions and Microsystems, Moscow Aviation Institute, Assoc. Professor, Department of Design and Certification of Aviation Engineering, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Akulin P.V., Nasonov F.A. Composite material properties degradation under the multi-cycle loading. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 1 (152), pp. 4–13 (in Russ.). EDN: UXYWYU