



Научная статья / Original Article

УДК 534.1: 629.7: 519.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188103>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PFUPNA>

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМЫХ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ С УЧЁТОМ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

С.С. Лопатин[✉]

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

г. Москва, Россия

✉ Ar77eny@gmail.com

Цитирование: Лопатин С.С. Анализ амплитудно-зависимых демпфирующих свойств однонаправленных алюмостеклопластиков с учётом термоциклирования // Труды МАИ. 2026. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188103>

Аннотация. В данной работе исследуется влияние термоциклирования на динамических характеристик однонаправленных алюмостеклопластиков. Испытания проводились на специальной установке по методу затухающих колебаний с горизонтальным приложением нагрузки. Установка обеспечивает отсутствие внешних помех и переходных процессов. Контроль амплитуды осуществлялся с использованием триангуляционного лазерного датчика. Образцы представляют собой композитную структуру из трёх слоёв алюминия и двух слоёв стеклопластика с продольной и поперечной укладкой. В рамках данного исследования испытывались образцы алюмостеклопластика. Каждая партия состояла из трех однотипных прямоугольных образцов. Испытания проводились при фиксированной амплитуде равной 5 мм. По результатам испытаний получены динамические характеристики образцов до и после термоциклирования. Представлены экспериментальные результаты и соответствующий анализ для определения амплитудно-зависимых

демпфирующих свойств слоистых композиционных материалов. Наблюдается существенное изменение демпфирования образцов после термоциклирования с изменением собственной частоты затухающих колебаний. Исследование образцов после термоциклирования исключило образование каких-либо расслоений в слоях алюмопластика. Данный факт говорит о деградации компонентов композиционного материала. Так как для слоев алюминия такое количество циклов и диапазон температур не может повлиять на изменение свойств, то стоит полагать что деградация свойств происходит в слоях стекловолокна.

Ключевые слова: однонаправленные композитные материалы; алюмопластики; термоциклирование; собственные частоты; коэффициент демпфирования.

ANALYSIS OF AMPLITUDE-DEPENDENT DAMPING PROPERTIES OF UNIDIRECTIONAL ALUMINUM-FIBERGLASS PLASTICS TAKING INTO ACCOUNT THERMAL CYCLING

S.S. Lopatin✉

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ Ar77eny@gmail.com

Citation: Lopatin S.S. Analysis of amplitude-dependent damping properties of unidirectional aluminum-fiberglass plastics taking into account thermal cycling // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188103>

Abstract. This study investigates the effect of thermal cycling on the dynamic properties of unidirectional aluminum-glass composites. The tests were conducted on a specialized testing rig using the damped oscillation method with horizontal loading. The setup ensures the absence of external interference and transient processes. Amplitude control was performed using a triangulation laser sensor. The specimens consist of a composite structure comprising three layers of aluminum and two layers of fiberglass, arranged in longitudinal and transverse orientations. Aluminum-fiberglass samples were tested as part of this study. Each batch consisted of three identical rectangular samples. The tests

were conducted at a fixed amplitude of 5 mm. The test results yielded the dynamic characteristics of the samples before and after thermal cycling. Experimental results and corresponding analysis are presented to determine the amplitude-dependent damping properties of layered composite materials. A significant change in the damping of the samples is observed after thermal cycling, accompanied by a change in the natural frequency of the damped oscillations. Examination of the samples after thermal cycling ruled out the formation of any delamination in the aluminum-glass-fiber composite layers. This fact indicates degradation of the composite material's components. Since such a number of cycles and temperature range cannot affect the properties of the aluminum layers, it is reasonable to assume that the degradation of properties occurs in the glass fiber layers.

Keywords: unidirectional composite materials; aluminum-fiberglass; thermal cycling; natural period; damping coefficient.

Введение

Слоистые алюмокомпозиты класса СИАЛ широко используемый и перспективный конструкционный слоистый гибридный материал, который состоит из тонких листов алюминиевых сплавов (Al-Li среднепрочного сплава пониженной плотности 1441 и др.) и прослоек композита [1]. Прослойки композита состоят, обычно, из нескольких монослоев однонаправленного клееного препрега, армированного высокопрочными стеклонаполнителями; расположение и количество слоёв и листов определяются назначением и габаритом детали [2-5]. Слоистые материалы обладают уникальным комплексом свойств по сравнению с монолитными алюминиевыми листами: высокой трещиностойкостью, пониженной плотностью, высокой прочностью, ударостойкостью, коррозионной стойкостью [6-7].

В работе [8] рассмотрено влияние термоциклирования на температуры превращения в сплавах Ni, которые подвергаются различным видам термомеханической обработки. В ходе исследования обнаружено, что в образцах с различным содержанием Ni температуры превращения меняются при

термоциклировании. В состаренных образцах с высоким содержанием никеля и отожженных при температуре ниже температуры рекристаллизации после наклепа они оказались постоянными даже после термоциклирования. Изучена микроструктура сплава с помощью электронной микроскопии и отмечено, что дислокации были введены в результате термоциклирования в обработанных раствором образцах. Плотность дислокаций увеличивалась с увеличением числа термических циклов. Термоциклирование оказывает достаточно сильное влияние на микроструктуру материала.

Особое внимание заслуживают свойства металлополимерных материалов типа СИАЛ или GLARE после термоциклирования. В работе [9] рассмотрен материал GLARE со встроенным нагревательным элементом. Данный металловолоконный композиционный материал создан для противообледенительных систем в конструкциях самолетов. Материал находится под воздействием циклической тепловой и механической нагрузки. В ранее опубликованных исследованиях влияние термоциклирования и влаги на нагретый алюмостеклопластик изучалось отдельно и в сочетании друг с другом [10-17]. Среди известных результатов в данной области можно отметить работы [18-21], в которых проводилось измерение параметров демпфирования материалов типа GLARE. Однако работ по исследованию влияния термоциклирования на динамические свойства алюмостеклопластиков практически отсутствуют.

Термоциклирование крайне важно исследовать для оценки напряженно-деформированного состояния. Знание о том, как термоциклирование увеличивает внутреннее рассеяние энергии, применимо при создании узлов, работающих в условиях интенсивных вибраций. Это позволяет использовать алюмостеклопластики не только как силовые элементы, но и как адаптивные виброгасители, характеристики которых прогнозируются с учетом температурной предыстории эксплуатации.

Материалы и методы

Исследуются образцы алюмостеклопластика, состоящие из трёх слоёв алюминия марки 1441-T1 с толщиной каждого слоя порядка 0.3 мм и двух слоёв стекловолокна, с толщиной каждого слоя порядка 0.14 мм. Габариты каждого образца 250 мм x 20 мм. Фото характерных исследуемых образцов представлено на рисунке 1.

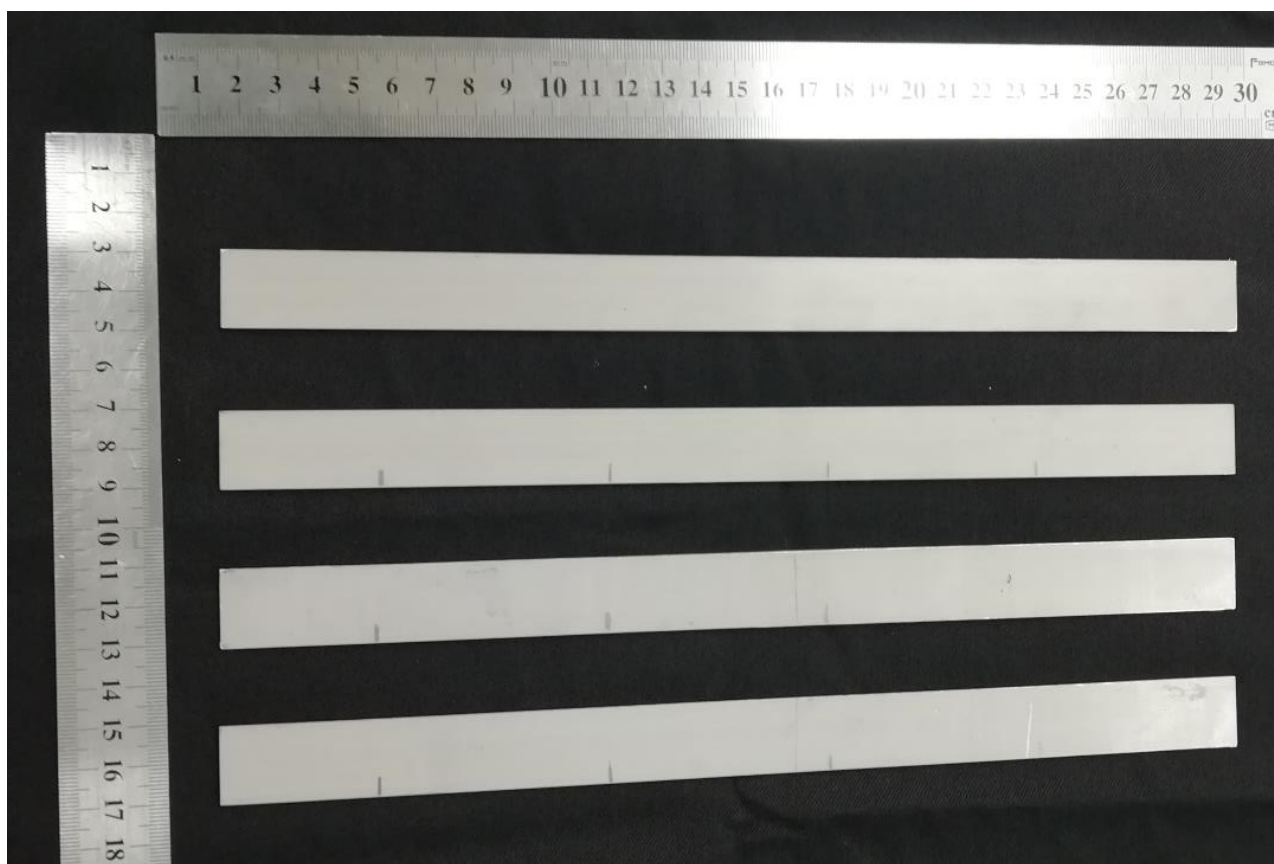


Рисунок 1 - Фото исследуемых образцов

Испытания проводятся на специальной установке по методу затухающих колебаний с горизонтальным приложением нагрузки [18]. Установка обеспечивает отсутствие внешних помех и переходных процессов. Для фиксации амплитуды использовался триангуляционный лазерный датчик RIFTEK RF603. Отклонение образцов на заданную амплитуду производилось на вылете 240 мм с помощью металлического штока. Образец закрепляется жёстко в тисках. Общий вид установки показан на (рисунок 2). Ввиду возможного расслоения амплитуда ограничена значением 5 мм.

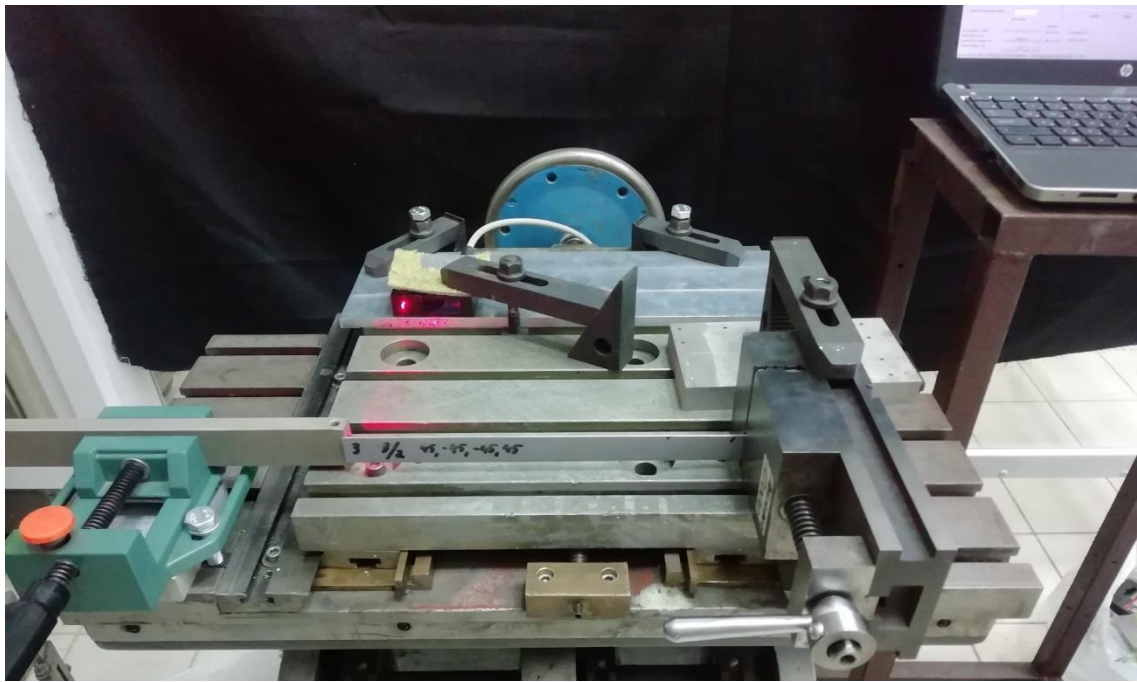


Рисунок 2 - Общий вид установки с закреплённым образцом

Обработка полученных результатов испытаний в виде графиков перемещения от времени проводится методом быстрого преобразования Фурье для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) зарегистрированных колебаний. Находится пик первой резонансной частоты, и его ширина позволяет по соотношению (ГОСТ 30630.1.8–2002, ASTM E756) найти коэффициент демпфирования образца:

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0} \quad (1)$$

где ω_0 – частота резонанса; $\omega_1 < \omega_2$ – частоты вблизи резонанса, при которых значение амплитуды уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с амплитудой резонанса [19].

Термоциклирование проводилось с использованием климатической камеры Votsch vs3 7018с. Один цикл состоял из нагрева камеры до 70°C, выдержкой при этой температуре в течении 1 часа и последующем охлаждением до -70°C, и аналогичной выдержкой в течении 1 часа. Термоциклирование проводилось при 25 циклах. Фрагмент циклограммы процесса термоциклирования образцов представлен на рисунке 3.

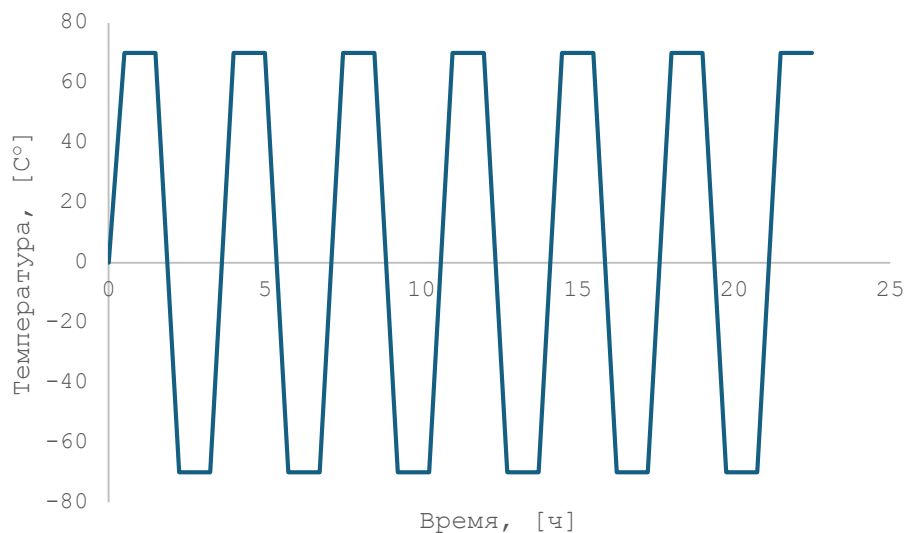


Рисунок 3 - Фрагмент циклограммы

Результаты и обсуждение

Для образцов до и после термоциклирования проводились испытания по методу затухающих колебаний. Испытывались 2 варианта однонаправленных алюмостеклопластиков с ориентацией волокон стеклопластика [0]. В результате испытаний образцов до и после было зафиксировано изменение собственной частоты и коэффициента демпфирования у образцов до и после термоциклирования для всех рассматриваемых вариантов.

Для исключения возможного расслоения в образцах при расслоении проводилось томографическое исследование термоциклированных образцов. Томографическое исследование проводилось с использованием исследовательского микротомографа nanoVoxel-4000. Пример результата томографии образцов после термоциклирования представлен на рисунке 4.

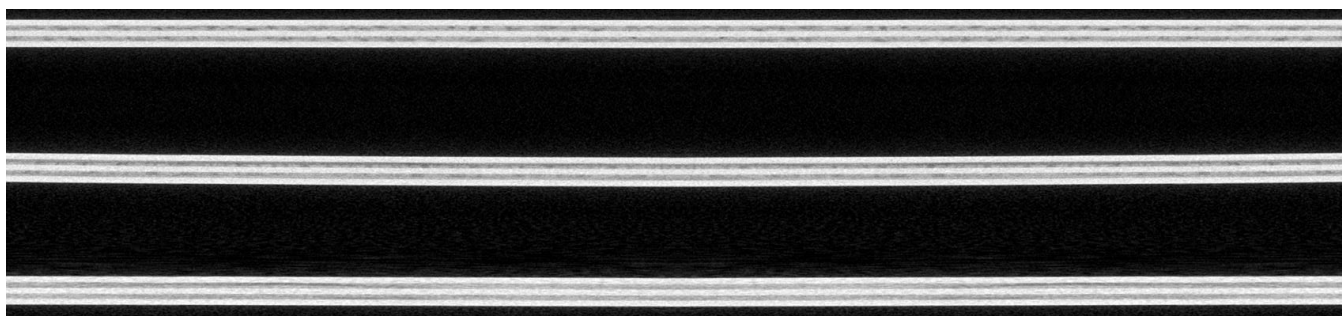


Рисунок 4 - Результат томографии образцов после термоциклирования

Анализ результата томографии исключило наличие возможных дефектов как до, так и после термоциклирования.

Сравнение графиков изменения амплитуды свободных затухающих колебаний от времени образцов до и после термоциклирования для образцов представлены на рисунке 5.

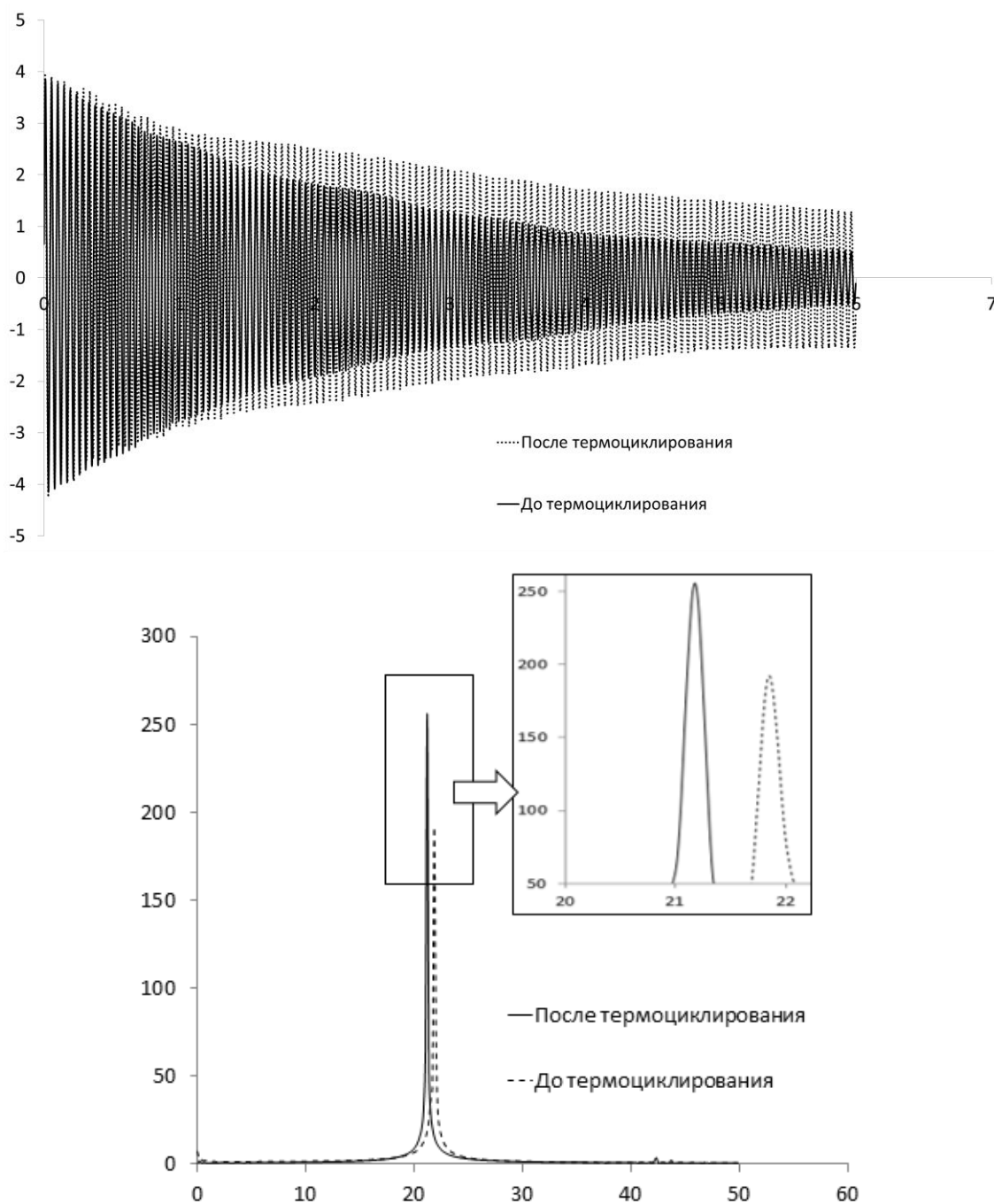


Рисунок 5 - Результат изменения амплитуды свободных затухающих колебаний от времени образцов до и после термоциклирования

В результате анализа полученных результатов фиксировалось существенное изменение амплитуды свободных затухающих колебаний от времени образцов до и после термоциклирования. Наблюдается уменьшение первой собственной частоты что говорит о снижении жесткости, в следствии деградации и уменьшении эффективного модуля упругости.

Заключение

В работе исследовалось влияние термоциклирования однонаправленных алюмостеклопластиков. В результате анализа амплитудно-зависимых демпфирующих свойств были получены графики сравнения изменения амплитуды свободных затухающих колебаний от времени и АЧХ образцов. Наблюдается существенное изменение демпфирования образцов после термоциклирования с изменением собственной частоты затухающих колебаний. Исследование и последующий анализ образцов до и после термоциклирования с использованием томографии исключило образование каких-либо расслоений в слоях алюмостеклопластика. Данный факт говорит о деградации компонентов композиционного материала. Так как для слоев алюминия такое количество циклов и диапазон температур не может повлиять на изменение свойств, то стоит полагать что деградация свойств происходит в слоях стекловолокна. Оценка деградации свойств стеклопластика возможна как численным методом, так и аналитическим. Численный метод может быть основан на методе конечных элементов. Аналитическое исследование деградации свойств может быть основано на уравнение прогиба в рамках теории балки Бернулли-Эйлера с учетом теории Тимошенко.

Результаты исследования деградации свойств алюмостеклопластиков при термоциклировании имеют прямое прикладное значение в отраслях, использующих гибридные слоистые композиты в условиях переменных температурных полей. Алюмостеклопластики широко применяются в обшивках фюзеляжей и элементах оперения. Выявленное изменение собственной частоты и демпфирования после термоциклирования критически важно для расчетов на флаттер и бафтинг. Понимание того, что деградация происходит именно в

стеклопластиковых слоях (при сохранении целостности алюминия), позволяет более точно прогнозировать остаточный ресурс летательного аппарата и корректировать межпроверочные и межремонтные интервалы, основываясь на изменении динамического отклика конструкции. Изменение АЧХ служит индикатором «усталости» композитного слоя еще до появления видимых расслоений, что позволяет предотвратить внезапный отказ детали.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Болотин В. В. Динамическая устойчивость упругих систем. Москва : Гостехиздат, 1956. 600 с.
2. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Прикладные методы в теории колебаний. Москва : Наука, 1988. 328 с.
3. Прокудин О.А., Соляев Ю.О., Бабайцев А.В., Артемьев А.В., Коробков М.А. Динамические характеристики трехслойных балок с несущими слоями из алюмостеклопластика. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 260–270. doi: 10.15593/perm.mech/2020.4.22
4. Vermeeren, Coen (Editor) Around Glare: A New Aircraft Material in Context Published by Springer, August 1, 2002 ISBN 1402007787;
5. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Антипов В.В., Сидельников В.В., Гриневич А.В., Постнов В.И. Слоистые алюмополимерные материалы СИАЛ // Клеи. Герметики. Технологии. 2007. №5;
6. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмостеклопластиков на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2.

7. S.K. Giri, M. Krishnan, U. Ramamurty; Enhancement of fatigue life of Ni-Ti-Fe shape memory alloys by thermal cycling; Mater. Sci. Eng. A, 528 (2010), pp. 363-370; <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.006>
8. S. Miyazaki, Y. Igo, K. Otsuka; Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of Ti-Ni alloys; Acta Metall., 34 (1986), pp. 2045-2051; [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90263-4](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90263-4)
9. M. Liu, P. Diercks, A. Manzoni, J. Čížek , U. Ramamurty, J. Banhart; Positron annihilation investigation of thermal cycling induced martensitic transformation in NiTi shape memory alloy; <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117298>; Acta Materialia Volume 220, November 2021, 117298
10. Niu B., He X., Shan Y., Zhang P. On objective functions of minimizing the vibration response of continuum structures subjected to external harmonic excitation, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, vol. 57, pp. 2291–2307. DOI: 10.1007/s00158-017-1859-1.
11. Zhengping Lu, Lihua Yu, Junhua Xu , Chengchao Du , Hao Zhang; Influence of secondary thermal cycle on softening behavior and mechanism of heat affected zone in TIG-welded spray formed 7055 aluminum alloy; <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.062>; Journal of Materials Research and Technology Volume 21, November–December 2022, Pages 2118-2132;
12. M. Mohseni et al. A novel electro-thermal anti-icing system for fiber-reinforced polymer composite airfoils, Cold Regions Sci Technol (2013); https://www.researchgate.net/publication/256996062_A_novel_electro-thermal_anti-icing_system_for_fiber-reinforced_polymer_composite_airfoils
13. H. Li et al. The effect of thermal fatigue on the mechanical properties of the novel fiber metal laminates based on aluminium-lithium alloy, Compos: Part A (2016); <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X16000075>
14. J.J. Homan Fatigue initiation in Fibre Metal Laminates, Int J Fatigue (2006)
15. B. Müller et al. Thermal cycling of (heated) Fibre Metal Laminates, Compos Struct (2016)
16. Timoshenko S. P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* (Oscillations in engineering), Moscow, Nauka, 1967, 444 p.

17. Chandan K. Roy a, Sushil Bhavnani a, Michael C. Hamilton b, R. Wayne Johnson c, Roy W. Knight a, Daniel K. Harris; Accelerated aging and thermal cycling of low melting temperature alloys as wet thermal interface materials; *Microelectronics Reliability* Volume 55, Issue 12, Part B, December 2015, Pages 2698-2704 <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.08.020>
18. Бабайцев А.В., Лопатин С.С. Особенности испытания пластин по методу свободных затухающих колебаний. *СТИН*. 2023. № 10. С. 15-17.
19. Babaytsev A.V., Lopatin S.S., Nasonov F.A. Study of dynamic characteristics of hybrid titanium-polymer composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Т. 20. № 1. С. 109-115. DOI:10.22337/2587-9618-2024-20-1-109-115
20. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures / E.C. Botelho [et al.] // *Materials Research*. – 2006. – Vol. 9, № 3. – P. 247–256.
21. Iriondo J., Aretxabaleta L., Aizpuru A. Characterisation of the elastic and damping properties of traditional FML and FML based on a self-reinforced polypropylene // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 131. – P. 47–54. doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.047

References

1. Bolotin V. V. *Dynamic Stability of Elastic Systems*. Moscow: Gostekhizdat, 1956. 600 p.
2. [2] Zhuravlev V. F., Klimov D. M. *Applied Methods in the Theory of Oscillations*. Moscow: Nauka, 1988. 328 p.
3. Prokudin O. A., Solyaev Yu. O., Babaitsev A. V., Artemyev A. V., Korobkov M. A. Dynamic Characteristics of Sandwich Beams with Load-Bearing Layers Made of Aluminum-Fiberglass Reinforced Plastic. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. – 2020. – No. 4. – pp. 260–270. doi: 10.15593/perm.mech/2020.4.22
4. Vermeeren, Coen (Editor) *Around Glare: A New Aircraft Material in Context* Published by Springer, August 1, 2002 ISBN 1402007787;

5. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Lukina N.F., Antipov V.V., Sidelnikov V.V., Grinevich A.V., Postnov V.I. Layered aluminum-polymer materials SIAL // Adhesives. Sealants. Technologies. 2007. No. 5.;
6. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. New class of layered aluminum-glass plastics based on aluminum-lithium alloy 1441 with reduced density // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2011. No. SP2.
7. S.K. Giri, M. Krishnan, U. Ramamurty; Enhancement of fatigue life of Ni-Ti-Fe shape memory alloys by thermal cycling; Mater. Sci. Eng. A, 528 (2010), pp. 363-370; <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.006>
8. S. Miyazaki, Y. Igo, K. Otsuka; Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of Ti-Ni alloys; Acta Metall., 34 (1986), pp. 2045-2051; [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90263-4](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90263-4)
9. M. Liu, P. Diercks, A. Manzoni, J. Čížek , U. Ramamurty, J. Banhart; Positron annihilation investigation of thermal cycling induced martensitic transformation in NiTi shape memory alloy; <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117298>; Acta Materialia Volume 220, November 2021, 117298
10. Niu B., He X., Shan Y., Zhang P. On objective functions of minimizing the vibration response of continuum structures subjected to external harmonic excitation, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, vol. 57, pp. 2291–2307. DOI: 10.1007/s00158-017-1859-1.
11. Zhengping Lu, Lihua Yu, Junhua Xu , Chengchao Du , Hao Zhang; Influence of secondary thermal cycle on softening behavior and mechanism of heat affected zone in TIG-welded spray formed 7055 aluminum alloy; <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.062>; Journal of Materials Research and Technology Volume 21, November–December 2022, Pages 2118-2132;
12. M. Mohseni et al. A novel electro-thermal anti-icing system for fiber-reinforced polymer composite airfoils, Cold Regions Sci Technol (2013); https://www.researchgate.net/publication/256996062_A_novel_electro-thermal_anti-icing_system_for_fiber-reinforced_polymer_composite_airfoils

13. H. Li et al. The effect of thermal fatigue on the mechanical properties of the novel fiber metal laminates based on aluminium-lithium alloy, *Compos: Part A* (2016); <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X16000075>
14. J.J. Homan Fatigue initiation in Fibre Metal Laminates, *Int J Fatigue* (2006)
15. B. Müller et al. Thermal cycling of (heated) Fibre Metal Laminates, *Compos Struct* (2016)
16. Timoshenko S. *P. Kolebaniya v inzhenernom dele* (Oscillations in engineering), Moscow, Nauka, 1967, 444 p.
17. Chandan K. Roy a, Sushil Bhavnani a, Michael C. Hamilton b, R. Wayne Johnson c, Roy W. Knight a, Daniel K. Harris; Accelerated aging and thermal cycling of low melting temperature alloys as wet thermal interface materials; *Microelectronics Reliability* Volume 55, Issue 12, Part B, December 2015, Pages 2698-2704 <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.08.020>
18. Babaytsev A.V., Lopatin S.S. Features of testing plates using the free damped oscillation method. *STIN*. 2023. No. 10. pp. 15-17.
19. Babaytsev A.V., Lopatin S.S., Nasonov F.A. Study of dynamic characteristics of hybrid titanium-polymer composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. T. 20. № 1. C. 109-115. DOI:10.22337/2587-9618-2024-20-1-109-115
20. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures / E.C. Botelho [et al.] // *Materials Research*. – 2006. – Vol. 9, № 3. – P. 247–256.
21. Iriondo J., Aretxabaleta L., Aizpuru A. Characterisation of the elastic and damping properties of traditional FML and FML based on a self-reinforced polypropylene // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 131. – P. 47–54. doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.047

Информация об авторах

Лопатин Сергей Сергеевич, аспирант кафедры 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения», МАИ, г. Москва, Россия;
e-mail: orochimaruninja@mail.ru

Information about the authors

Sergey S. Lopatin, postgraduate student of the Department "Advanced Materials and Technologies for Aerospace Applications", MAI, Moscow, Russia;
e-mail: orochimaruninja@mail.ru

Получено 02 марта 2026 ● Принято к публикации 17 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026
Received 02 March 2026 ● Accepted 17 March 2026 ● Published 30 April 2026
