

УДК 539.374.519.8

ВЛИЯНИЕ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЧАСТОТУ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

А.В. АХМЕДЬЯНОВ¹, А.Н. ЕРМОЛЕНКО², С.Н. НИКИТИН³, П.В. СОЛОВЬЕВ⁴

¹mr.versatile77@mail.ru, ²tolja@inbox.ru, ³nio-8450@yandex.ru, ⁴paulnightingale@mail.ru,

^{1,2,4} ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

³ АО «Институт технологии и организации производства», г. Уфа, Россия

Поступила в редакцию 03.11.2022

Аннотация. Рассмотрены результаты испытаний клеевых соединений полимерного композиционного материала (ПКМ) на сдвиг с учетом эксплуатационных факторов и технологии изготовления композитных материалов. Приведены результаты виброиспытаний и компьютерного моделирования по определению частот свободных колебаний (ЧСК). Описаны установки для термоциклирования и виброиспытания, а также режимы испытаний.

Ключевые слова: клеевые соединения, ПКМ, термоциклические нагрузки, ступенчатое отверждение.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из широко используемых технологий по изготовлению геометрически сложных изделий из ПКМ является стыковка деталей и последующей их сборки. Такой технологии подвергаются ПКМ на основе реактопластов. Сборка осуществляется разнообразными способами: клеевыми, механическими, комбинированными [1–3]. В данной статье рассматриваются результаты прочностных, вибрационных испытаний клеевых соединений со ступенчатым отверждением связующего. Клеевые соединения различных конструкций работают в условиях теплосмен. Научные работы, проводимые в этой сфере, освещают область знаний, касающуюся прочности при термоциклировании ПКМ [9,10], и остается неизученной тема прочности клеевых соединений ПКМ при термоциклических нагрузках. В том числе, не исследован способ клеевого соединения со ступенчатым отверждением. Таким образом, можно сформировать область научного исследования: исследование прочности клеевого соединения ПКМ при термоциклических и вибрационных нагрузках, в том числе полученных ступенчатым отверждением.

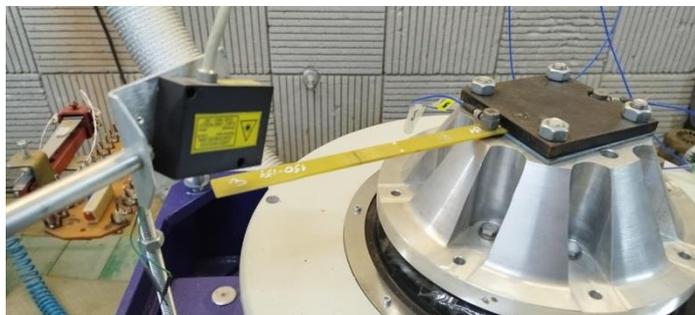
ОПИСАНИЕ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИБРОИСПЫТАНИЙ И ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

Испытания при термоциклических нагрузках проводились на специальной установке, собранной на основе стандартных элементов, позволяющей производить нагрев образцов в специальной камере (рис. 5), поддержание температуры, охлаждение. Схема установки представлена на рис. 1. Режим теплосмен реализуется по режиму (графику), задаваемому пользователем (рис. 2). Каждый этап управляется программно с ПК. Для испытаний задано 700 циклов. Регулирование времени цикла, запуск, остановка процесса теплосмен осуществляется с помощью программного обеспечения на базе инструментального программного комплекса для промышленной автоматизации *CoDeSys* (сокращение от слов *Controller Development System*), позволяющего автоматизировать процессы.

ЧСК образца и частоты действия внешнего воздействия происходит регистрация стандом значения этой резонансной частоты. Схема установки, закрепление образца с датчиком приведены на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Стенд ВЭДС-400 для виброиспытаний:
а) схема; б) консольное закрепление стеклопластика.

Режимы, при которых проводились испытания по определению ЧСК композитных стержней:

- ускорение стола вибростенда: 5 м/с²;
- исследуемый диапазон частот: 10–350 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для исследования взято пять типов образцов на основе расплавного связующего ВСТ-1210 (производитель ВИАМ) и стеклоткани Т10-14. Используются образцы клеевых соединений стеклопластика с единовременным и со ступенчатым отверждением, сплошные образцы, образцы отвержденного связующего также с единовременным и со ступенчатым отверждением.

Ступенчатое (постадийное) отверждение частей отдельных деталей (рис. 4) с дальнейшей сборкой с помощью сополимеризации (рис. 5) (либо химической сварки) в монолитную конструкцию [4,5]. Фактор, способствующий увеличению прочности такого соединения – это единая полимерная монолитность матричного материала. С этой целью в соединяемых деталях в местах, предназначенных для соединения, матрицу не отверждают, т.е. оставляют в исходном состоянии. В процессе формования изделий предусматриваются места в пресс-форме с пониженной температурой для обеспечения более низкой степени отверждения в зоне последующего соединения. В дальнейшем зона с неотвержденным связующим используется для клеевого соединения.

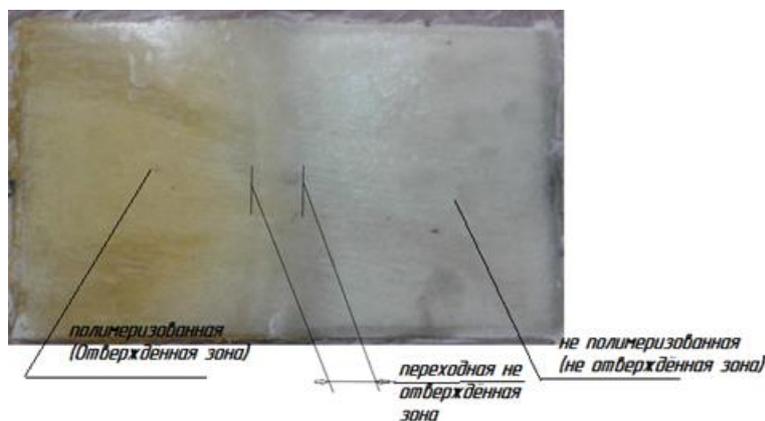


Рис. 4. Образец плиты с отвержденной, неотвержденной, переходной зонами.

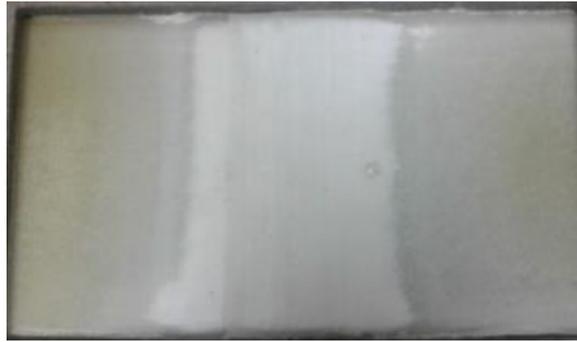


Рис. 5. Образец ПКМ с отвержденной, неотвержденной и переходной зонами.
Установка соединяемых половин клеевого соединения в пресс-форму.



а)

б)

в)

Рис. 6. Образец, полученные разными технологиями:
а) образцы с отвержденной матрицей; б) образцы клеевого соединения;
в) образцы, установленные в испытательной камере.

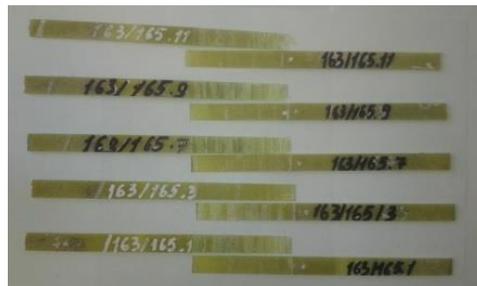


Рис. 7. Образцы соединений после разрушения.

Упруго-прочностные исследования образцов проводились после 0, 100, 400, 700 циклов теплосмен. Испытания включали: механические испытания на определение модуля упругости при сдвиговой нагрузке, предел прочности (после 0; 700 циклов) путем растяжения при нормальной температуре (20 °С) (рис. 7).

По результатам испытаний образцов получены следующие результаты (рис. 8).

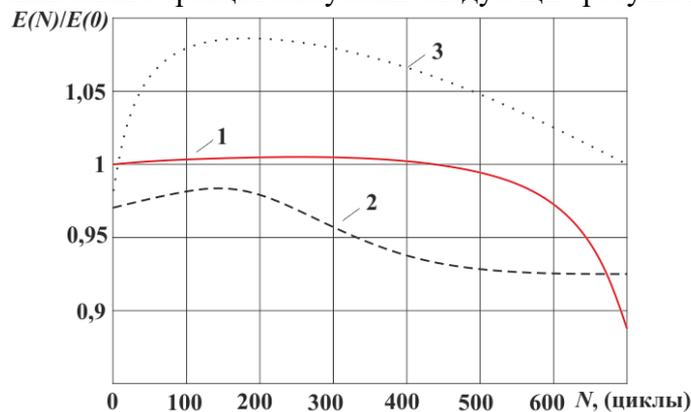


Рис. 8. Влияние термоциклирования на продольной модуль упругости образцов:
1 – сплошной образец; 2 – одновременное отверждение; 3 – ступенчатое отверждение.

В результате испытаний выявился характер влияния термоциклов на продольный модуль упругости, где видно, что наибольшую жесткость имеют образцы с ступенчатым способом отверждения. Для всех образцов характерно первичное повышение жесткости, связанное с до отверждением полимерной матрицы. В дальнейшем идет снижение нормального модуля упругости в связи с термической деградацией матрицы. В образцах со ступенчатым отверждением процесс более раннего увеличения модуля связан с технологическими дефектами при создании образцов. Так как клеевое соединение формировалось не слой за слоем, а пакет слоев с пакетом слоев, происходило наслоение слоев в зоне стыковки. Это привело к дополнительному увеличению продольного модуля упругости клеевого соединения.

Прочность образцов на сдвиг в зависимости от способа изготовления имеет тенденцию снижения в результате термоциклических нагрузок. Максимальная сдвиговая прочность клеевых соединений образцов составила в среднем 17,5 МПа (образцы единовременного клеевого соединения). В результате термоциклических испытаний снижение их прочности составило 13,1%. Прочность при сдвиге образцов со ступенчатым отверждением также снизилась на 5%. Величина снижения сдвиговой прочности обоих типов образцов не имеет больших отличий, что подтверждает жизнеспособность клеевого способа соединения ПКМ со ступенчатым отверждением (рис. 9).

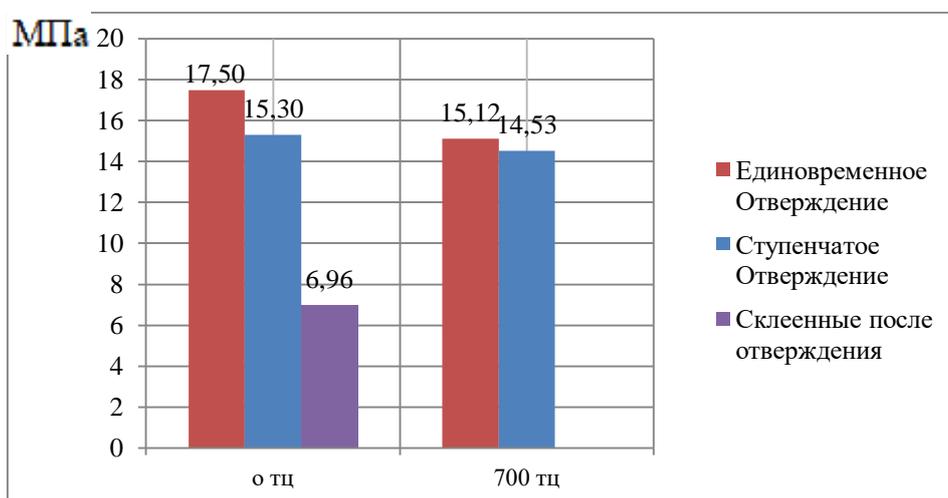
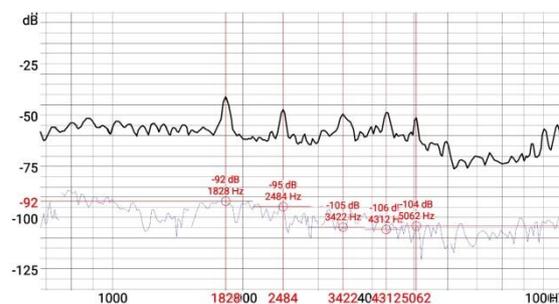


Рис. 9. Изменение значения прочности на сдвиг образцов до и после термоциклирования.

Также были проведены ряд испытаний и компьютерное моделирование при тех же условиях по определению частот свободных колебаний образцов до термоциклирования и после (700 циклов) (рис. 10).



а)



б)

	Эксперимент	Моделирование	Расхождение
	Частота, Гц	Частота, Гц	с моделир, %
1			0
2			0
3		3,53E-09	
4		8,20E-04	
5		9,90E-04	
6		2,20E-03	
7	1828	1831,9	-0,21
8	2484	2460,0	0,98

в)

Рис. 10. Абсолютные значения ЧСК сплошных образцов до термоциклирования:
 а) результаты испытаний на вибростенде ВЭДС-400; б) результаты акустических испытаний (программа Spectroid); в) таблица сравнений разных экспериментов с моделированием

На рис. 11 приведены в относительных единицах результаты ЧСК образцов, полученных разными технологиями. Взяты две контрольные точки термоциклирования: 1 – к.т. при 0 циклов; 2 – к.т. при 700 циклов.

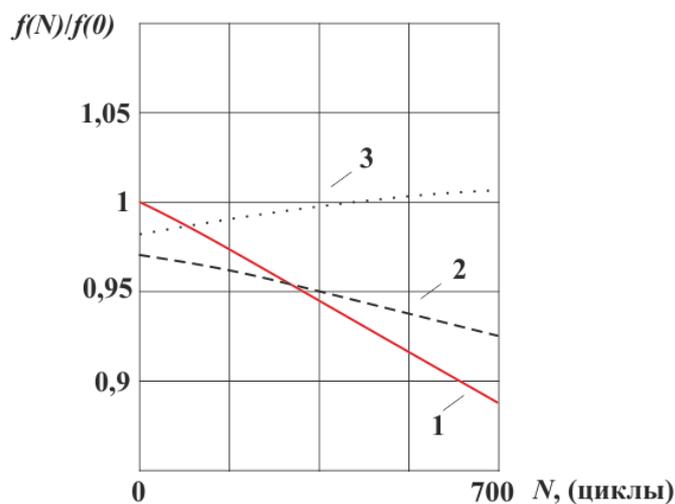


Рис. 11. Зависимость ЧСК от количества термоциклов:
 1 – сплошной образец; 2 – одновременное отверждение; 3 – ступенчатое отверждение.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен способ клеевого соединения со ступенчатым отверждением связующего. Проведены исследования влияния термоциклических нагрузок на прочность клеевых соединений стеклопластика на образцах. Были определены ЧСК разными методами до и после термоциклирования. Результаты показывают, что разные технологические способы получения образцов и термоциклическое воздействие, даже в небольших диапазонах, значительно изменяют упругие и прочностные характеристики стеклопластиков, а именно модули упругости, модули сдвига, предел прочности. Эти изменения смещают ЧСК в этих пределах на $\approx 15\text{--}20\%$. Результаты данных испытаний позволяют инженеру-конструктору выбрать ту или иную технологию получения сборочной единицы для регулирования ЧСК.

Метод ступенчатого отверждения несколько хуже по прочности, чем одновременное отверждение, однако в некоторых случаях он технологически выгоднее. Существуют конструкции типа центробежного компрессора, при изготовлении которого невозможно формировать требуемую схему армирования за одновременное отверждение. Поэтому применяют ступенчатое отверждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров Г.В.** Способы соединения деталей из пластических масс. Москва: «ХИМИЯ», 1979. [G.V. Komarov, Methods for the Joining of Parts Made of Plastics, (in Russian). Moscow: KHIMIYA, 1979.]
2. **Карпов Я.С., Кривенда С.П., Рябков В.И.** Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. Харьков: ХАИ, 1997. 200 с. [Ya.S. Karpov, S.P. Krivenda, V.I. Ryabkov, Design of the Joints of Parts Made of Composite Materials: study guide, (in Russian). Kharkov: KhAI, 1997. 200 p.]
3. **Царахов Ю.С.** Конструирование соединений элементов летательных аппаратов из композиционных материалов: учебное пособие. Темплан №51. Москва: МФТИ, 1980. [Yu.S. Tsarakhov, Design of the Joints of Aircraft Elements Made of Composite Materials: study guide, (in Russian). Thematic plan No. 51. Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology, 1980.]
4. **Зайцев К.И., Мацюк Л.Н., Богдасhevский А.В. и др.** Сварка полимерных материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1988. – 312 с. [K.I. Zaitsev, L.N. Matsyuk, A.V. Bogdashevskiy, et al. Welding of Polymer Materials: reference book, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 312 p.]
5. **Патент РФ № 2652269** «Способ изготовления рабочего колеса компрессора из композиционного материала». [Russian Federation patent No. 2652269 “Method of making impeller of centrifugal compressor from composite material”, (in Russian).]
6. **Михайлин Ю.А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2010. [Yu.A. Mikhailin, Structural Polymer Composite Materials, (in Russian). Saint Petersburg: Nauchnye Osnovy I Tekhnologii, 2010.]
7. **Авиационные материалы:** справочник, под общ. ред. Каблова Е.Н., Том 7, Полимерные композиционные материалы. ВИАМ: Москва, 2010. [Aircraft Materials: reference book, ed. by E.N. Kablov, Vol. 7, Polymer Composite materials, (in Russian). VIAM: Moscow, 2010.]
8. **Петрова А.П.** Термостойкие клеи. - М.: Химия, 1977. – 200 с. [A.P. Petrova, Heat Resistant Adhesives, (in Russian). - Moscow: Khimiya, 1977. – 200 p.]
9. **Первушин Ю.С., Иванов М.А.** Экспериментальное исследование длительной прочности конструкции стеклопластиков при циклически изменяющихся температурах. Тезисы докладов научно-технической конференции. Свердловск, 1981. 41 с. [Yu.S. Pervushin, M.A. Ivanov, Experimental study of the long-term strength of a fiberglass structure at cyclically varying temperatures, (in Russian). In: Abstracts of a Scientific and Technical Conference. Sverdlovsk, 1981. 41 p.]
10. **Нгуен Дак Куанг,** Влияние термоциклических нагрузок на механические характеристики материала композиционных панелей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2015. [Nguyen Dac Quang, Effect of thermal cyclic loads on the mechanical characteristics of the composite panel material: Cand.Sci. thesis, 2015.]

ОБ АВТОРАХ

АХМЕДЬЯНОВ Алексей Венерович, аспирант кафедры сопротивления материалов. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2018). Дипл. магистр (УГАТУ, 2020). Исследования в области механики и колебаний изделий из КМ.

ЕРМОЛЕНКО Анатолий Николаевич, доцент каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочного производства (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 2009). Исследования в области механики деформируемого тела.

НИКИТИН Сергей Николаевич, соискатель кафедры сопротивления материалов. Дипл инженер-механик (УГАТУ, 1996). Готовит диссертацию в области композиционных материалов в авиастроении.

СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович, доцент каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инженер (УГАТУ, 2009). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2016). Исследования в области механики и технологии изготовления изделия из композиционных материалов.

METADATA

Title: Influence of adhesive joints after thermal cyclic tests on strength characteristics and the frequency of free vibrations.

Authors: A. V. Akhmedyanov¹, A. N. Ermolenko², S. N. Nikitin³, P. V. Soloviev⁴

Affiliation:

^{1, 2, 4} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

³ JSC “Institute of Technology and Production Organization” (JSC “NIIT”), Russia.

Email: ¹mr.versatile77@mail.ru, ²tolja@inbox.ru, ³nio-8450@yandex.ru, ⁴paulnightingale@mail.ru

Language: Russian

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 4 (102), pp. 59-66, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The results of shear tests of adhesive joints of a polymer composite material (PCM) are considered, taking into account the operational factors and manufacturing technology of composite materials. The results of vibration tests and computer modeling to determine free vibration frequencies (FVF) are presented. Installations for thermal cycling and vibration testing, as well as the test modes, are described.

Key words: adhesive joints, PCM, thermal cyclic loads, step curing.

About authors:

AKHMEDYANOV Alexey Venerovich, Postgrad. (PhD) Student at the Dept. of the Strength of Materials. Bachelor's degree (USATU, 2018). Master's degree (USATU, 2020). Research in the area of the mechanics and vibrations of products made of composite materials.

ERMOLENKO Anatoly Nikolaevich, Associate Prof. at the Dept. of the Strength of Materials. Dipl. Engineer in the technology and equipment for welding production (USATU, 2003). Cand. of Tech. Sci. in the dynamics, strength of machines, devices and equipment (USATU, 2009). Research in the area of the mechanics of deformable solids.

NIKITIN Sergey Nikolaevich, Postgrad. degree seeker at the Dept. of the Strength of Materials. Dipl. Mechanical Engineer (USATU, 1996). Prepares a thesis on composite materials in aeronautical engineering.

SOLOVIEV Pavel Vladimirovich, Associate Prof. at the Dept. of Materials Science and Metals Physics. Dipl. Engineer (USATU, 2009). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2016). Research in area of the mechanics and manufacturing technology of products made of composite materials.