

ХИМИЯ

Научная статья  
УДК 691.175.3

**Влияние режимов фрезерования на усталостную прочность  
модифицированных углепластиков при критических условиях эксплуатации**

**Игорь Сергеевич Болотников<sup>1</sup>, Екатерина Александровна Косенко<sup>2</sup>, Наталья Ивановна Баурова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ЗАО «Универсал-Аэро», Москва, Россия

<sup>1,2,3</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

*Автор, ответственный за переписку: Игорь Сергеевич Болотников, igor\_bolotnikov@rambler.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты исследований по оценке влияния режимов фрезерования углепластиков, в том числе с матрицами, модифицированными диметакрилатом триэтиленгликоля и силоксановым винилсодержащим каучуком с платиновым катализатором, на изменение их статической и циклической прочности при изгибном нагружении после выдержки в условиях низких отрицательных температур (–50 °С), высокой влажности и солевого тумана.

**Ключевые слова:** водяная пыль, низкая отрицательная температура, полимерные композиционные материалы, солевой туман, циклический изгиб

**Для цитирования:** Болотников И.С., Косенко Е.А., Баурова Н.И. Влияние режимов фрезерования на усталостную прочность модифицированных углепластиков при критических условиях эксплуатации // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 57–61.

CHEMISTRY

Original article

**Influence of milling modes on the fatigue strength of modified  
carbon fiber reinforced plastics under critical operating conditions**

**Igor S. Bolotnikov<sup>1</sup>, Ekaterina A. Kosenko<sup>2</sup>, Natalya I. Baurova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>CJSC «Universal-Aero», Moscow, Russia

<sup>1,2,3</sup>Moscow automobile and road construction state technical university (MADI), Moscow, Russia

*Corresponding author: Igor S. Bolotnikov, igor\_bolotnikov@rambler.ru*

**Abstract.** The results of studies assessing the influence of milling modes of carbon fiber reinforced plastics, including those with matrices modified with triethylene glycol dimethacrylate and siloxane vinyl-containing rubber with a platinum catalyst, on changes in their static and cyclic strength under flexural loading after exposure to conditions of low negative temperatures (–50 °C), high humidity and salt fog are presented.

**Keywords:** water spray, low negative temperature, polymer composite materials, salt fog, cyclic bending

**For citation:** Bolotnikov I.S., Kosenko E.A., Baurova N.I. Influence of milling modes on the fatigue strength of modified carbon composites under critical operating conditions // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):57–61.

**Введение**

В условиях стремительного развития технологий производства и увеличения требований к конструкционным материалам наблюдается неуклонный рост объема и номенклатуры изделий, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Являясь высокотехнологичными материалами, ПКМ позволяют создавать детали и конструкции с заданным комплексом свойств, адаптированным под различные условия эксплуатации. Это обуславливает их высокую востребованность в машиностроении, автомобилестроении, авиации и ракетно-космической отрасли.

Современный уровень разработок и исследований в области композитного материаловедения позволяет успешно расширять функциональные свойства ПКМ для их использования в производстве высоконагруженных, термостойких и ударопрочных конструкций, а также изделий, обладающих высокой

износостойкостью и устойчивостью к агрессивным средам и другим неблагоприятным факторам эксплуатации [1–3].

В настоящее время в условиях освоения арктической зоны актуальной научно-практической задачей является создание композитных деталей и конструкций, работающих в условиях морского климата, высокой влажности и низких отрицательных температурах.

Решение данной задачи, как правило, осуществляется путем разработки новых составов и структур ПКМ с применением методов модификации материалов матрицы и создания гибридных армирующих материалов. Однако долговечность композитных изделий определяется не только компонентами ПКМ, технологией и режимами формования, но и качеством постформовочной обработки [4, 5], которую выполняют различными методами, среди которых наиболее универсальными и широко распространенными являются методы механической обработки: фрезерование, точение, сверление и др.

При выполнении механической обработки, в частности, фрезерования изделий, изготовленных из ПКМ, основным технологическим режимом, от которого зависит производительность технологического процесса, является скорость подачи рабочего инструмента ( $s$ ). При этом увеличение скорости подачи режущего инструмента без регулирования другого показателя режима резания – частоты вращения фрезы ( $n$ ) – неизбежно приведет к увеличению составляющих сил резания, негативному воздействию вибраций и ударных нагрузок, что, в свою очередь, вызовет образование таких технологических дефектов как расслоение, вырывание волокон, термическая деструкция, выкрашивание матрицы и пр. [6–9]. Поэтому при поиске оптимальных режимов фрезерования изделий из ПКМ должна осуществляться вариация частоты вращения фрезы и скорости ее подачи.

**Целью работы** является обеспечение долговечности композитных деталей в критических условиях эксплуатации за счет обоснования выбора режимов их механической обработки с учетом влияния пластифицирующих матрицу добавок.

### **Материалы и технология получения образцов**

Для выполнения экспериментальных исследований были изготовлены листы углепластика. Листы углепластика формовались методом вакуумной инфузии из 4-х слоев углеродной ткани саржевого плетения (артикул УТ-3К-Т240) с использованием эпоксидной смолы на основе бисфенол – А марки 810-И с циклоалифатическим отвердителем двойного отверждения. В качестве пластифицирующих добавок эпоксидной матрицы использовались диметакрилат триэтиленгликоля и двухкомпонентный силиконовый эластомер (силоксановый винилсодержащий каучук с платиновым катализатором). Их выводили путем механического перемешивания при комнатной температуре вводились в количестве 3 масс. ч на 100 масс. ч. связующего.

Отверждение образцов осуществлялось в вакуумном мешке при комнатной температуре в течение 24 ч с последующим постотверждением в термошкафу при ступенчатом нагреве от 35 до 80 °С в течение 8 ч.

Штучные образцы с габаритными размерами 100×15×1,2 мм были получены фрезерованием рашпильной фрезой из твердосплавного материала марки АСТ 417 диаметром 4 мм с использованием двух сравниваемых режимов:

- 1 режим:  $s=100$  мм/мин и  $n=5$  тыс. об/мин;
- 2 режим:  $s=200$  мм/мин и  $n=10$  тыс. об/мин.

### **Методика выполнения исследований**

Для оценки влияния режимов фрезерования на усталостную прочность углепластиков использовалась авторская методика, на которую получен патент (Патент РФ № 2810964). Методика испытаний заключается в блочном циклическом изгибном нагружении образцов ПКМ прямоугольного сечения с заданной равной частотой и амплитудой. После реализации каждого блока циклического нагружения (5 тыс. циклов) выполнялось измерение статической прочности на заданную величину прогиба, равную величине амплитуды циклического нагружения. Такой подход позволил получить информацию о возникающей в процессе циклического нагружения локальной релаксации напряжений и интенсивности накопления поврежденности в матрице испытываемых образцов.

Определение статической прочности образцов при трехточечном изгибе выполнялось на машине «УТС 110М-50» (скорость нагружения 10 мм/мин, расстояние между опорами 80 мм).

Циклическое изгибное нагружение проводили на запатентованной установке (Патент РФ № 2788917) [10] с частотой 5 Гц и амплитудой, равной 14 мм (9 мм для серий образцов, выдержанных в условиях водяной пыли и солевого тумана), которая составила 80 % от средней величины максимально-го прогиба всех серий исследуемых образцов. Циклическое нагружение осуществлялось до разрушения



Таблица 1 – Прочность образцов углепластиков до и после циклического нагружения

Тип модификатора	Показатели прочности при статическом трехточечном изгибе			
	Средняя прочность при изгибе до циклического нагружения, МПа	Остаточная прочность при изгибе, мм	Средняя прочность при изгибе до циклического нагружения, МПа	Остаточная прочность при изгибе, мм
	Режимы фрезерования, n [тыс. об/мин] / s [мм/мин]			
	5/100		10/200	
Без влияния климатических факторов				
Без модификатора	1215	706	1165	1033*
Диметакрилат триэтиленгликоля	1110	696*	1008	554*
Силиконовый эластомер	1215	338*	1250	501*
При влиянии низкой отрицательной температуры –50 °С				
Без модификатора	1152	480*	1144	546*
Диметакрилат триэтиленгликоля	1107	441*	1034	617*
Силиконовый эластомер	1169	770*	1262	1042*
При влиянии водяной пыли				
Без модификатора	974	527*	917	412
Диметакрилат триэтиленгликоля	766	631	833	588
Силиконовый эластомер	977	473*	1009	430
При влиянии солевого тумана				
Без модификатора	947	543	821	554
С диметакрилатом триэтиленгликоля	927	948	912	870
Силиконовый эластомер	1058	1146	1082	829

Примечание: \*значения остаточной прочности образцов, не выдержавших полного числа циклов нагружения (см. рисунок 1).

Снижение усталостной прочности модифицированных образцов может быть связано с тем, что введение силиконового эластомера в состав матрицы повышает плотность материала. Это, в свою очередь, способствует снижению величины максимального прогиба и зоны упругой деформации. Снижение прочности у образцов, содержащих в качестве модифицирующей добавки диметакрилата триэтиленгликоля, может быть обусловлено снижением адгезионной и межслойной прочности.

При этом использование в качестве модифицирующей добавки силиконового эластомера позволяет получить наибольшую статическую прочность при изгибе после выдержки во всех исследуемых условиях. Среднее значение прочности данных образцов увеличивается при обработке на режимах с более высокими показателями (таблица 1).

При переходе в область действия отрицательных температур, а также после выдержки в условиях водяной пыли и солевого тумана, у всех серий образцов наблюдается снижение среднего значения прочности при изгибе (таблица 1).

Воздействие отрицательной температуры оказывает существенное влияние на снижение усталостной прочности. После выдержки при температуре –50 °С наибольшее количество циклов (20 тыс.), которое образец выдерживает до разрушения наблюдается у образцов углепластиков, не содержащих модификаторы в составе матрицы и полученных фрезерованием с использованием 2 режима обработки (рисунок 1б). При этом у всех исследуемых типов образцов значение остаточной прочности выше, а потеря прочности после циклического нагружения ниже, чем у углепластиков, полученных фрезерованием с использованием 1 режима обработки. Использование силиконового эластомера в качестве модификатора матрицы ПКМ существенно снижает усталостную прочность: количество циклов, которое образец выдер-

живает до разрушения составляет всего 5 тыс. При этом потеря прочности при фрезеровании на 1 и 2 режимах + составляет 34 и 17 % соответственно.

Выдержка в условиях водяной пыли и солевого тумана не привела к повышению жесткости образцов, выраженной через уменьшение величины максимального прогиба, что потребовало корректировки амплитуды циклического нагружения для данного типа образцов.

Использование в качестве модифицирующей добавки диметакрилата триэтиленгликоля и фрезерование данного типа образцов с применением 1 режима обработки позволяет обеспечить наибольшую усталостную прочность углепластиков после выдержки в условиях водяной пыли (*рисунок 1в* и *таблица 1*). Данные образцы выдерживают 100 тыс. циклов нагружения до разрушения, теряя при этом 17 % прочности.

Выдержка в солевом тумане не привела к потере прочности модифицированных углепластиков (режима обработки № 1) после завершения полного цикла нагружения на изгиб (см. *рисунок 1г*). При этом у образцов, содержащих в качестве модифицирующей добавки диметакрилат триэтиленгликоля и полученных фрезерованием на 2 режиме обработки, потеря прочности после циклического нагружения составила всего ~ 5 %.

### **Заключение**

Выбор материала модификатора матрицы и режимов фрезерования ПКМ определяется оптимальным сочетанием значений их прочности при статическом и циклическом нагружении с учетом условий эксплуатации.

### **Библиография**

1. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. 2017. № 9. С. 827–839.
2. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А. и др. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). С. 128–136.
3. Федоров С.Ю., Тарабрина Т.Д., Нелюб В.А. Современные технологии придания углепластикам функциональных свойств // Химическая промышленность сегодня. 2023. № 5. С. 4–10.
4. Bolotnikov I.S., Kosenko E.A., Demin P.E. Influence of machining modes and negative temperature on the static bending strength of carbon fiber reinforced plastics // Polymer Science – Series D. 2023. V. 16, N 4. P. 1028–1033.
5. Bolotnikov I.S., Kosenko E.A. Influence of Milling Conditions and Negative Temperature on the Strength of Carbon Fiber Reinforced Polymer during Cyclic Bending Loading // Russian Metallurgy (Metally). 2024. V. 2024, N 7. P. 1648–1653.
6. Митясов, Л.В. Особенности обработки углепластика // Главный механик. 2018. № 6. С. 25–28.
7. Karatas M.A., Gokkaya H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials // Defence Technology. 2018. V. 14, N 4. P. 318–326.
8. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (45). С. 106–118.
9. Рогов В.А., Тюкпиеков В.Н. Особенности обработки неметаллов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2000. № 3. С. 44–49.
10. Bolotnikov I.S. Development of a Testing Machine for Determining Fatigue Characteristics of Polymer Composite Materials under Cyclic Bending Loading // Steel in Translation. 2024. V. 54, N 11. P. 1068–1072.