

Научная статья
УДК 539.421.3

А.В. Гурджиев, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман

A.V. Gurdjiev, M.P. Tretiakov, V.E. Vildeman

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

**ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ КРУЧЕНИЯ
НА ЗАКРИТИЧЕСКУЮ СТАДИЮ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ВОЛОКНИСТОГО ПОЛИМЕРНОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

**INFLUENCE OF ADDITIONAL TORSIONAL VIBRATIONS
ON THE SUPERCRITICAL STAGE OF DEFORMATION
OF A FIBROUS POLYMER
COMPOSITE MATERIAL**

В реальных условиях эксплуатации элементы конструкций подвержены действию внешних нагрузок разной природы, которые могут действовать как по отдельности, так и совместно. Материал может вести себя по-разному в зависимости от действующих нагрузок и их комбинаций. Рассмотрим вид воздействий на пластинчатый образец заданной геометрии посредством одноосного нагружения с дополнительными вибрациями кручения. В результате можно сделать вывод о вкладе дополнительных вибраций в процесс разрушения материала в виде зарождения и равновесного роста трещины, образованной смешанной модой деформирования.

Ключевые слова: комплексное нагружение, вибрации, полимерный композит, равновесный рост трещины, безопасность разрушения

In real operating conditions, structural elements are subject to external loads of various nature, which can act both individually and together. A material can behave differently depending on the acting loads and their combinations. Let us consider the type of actions on a plate sample of a given geometry by means of uniaxial loading with additional torsion vibrations. As a result, we can draw conclusions about the contribution of additional vibrations to the process of destruction of the material in the form of the beginning and stable growth of a crack, formed by a mixed mode of deformation.

Keywords: complex loads, vibrations, polymer composite, constant crack growth, safe destruction.

Введение

Одной из главных проблем, связанных с конструкционными элементами деталей машин и механизмов, является процесс их деформирования с последующим разрушением. В зависимости от ответственности проектируемых

деталей определяются требования к их прочности и безопасности разрушения. Процессы, связанные с накоплением повреждений и полным разрушением материала, описываются на основе закритического участка на диаграмме деформирования. Этому направлению исследований посвящено множество научных статей [1, 2], где поднимаются вопросы влияния нагружающей системы [3, 4], общей геометрии [5], концентраторов [6] в образцах и температурных воздействий на процессы деформирования при разупрочнении – снижении нагрузок при увеличении перемещений.

Процесс эксплуатации конструкции предусматривает определённые воздействия, которые могут быть механической или физической природы. В большинстве случаев деталь или узел конструкции подвергается совместному действию нескольких повреждающих факторов различной интенсивности. Поэтому знание поведения материалов при действии комплексных нагрузок имеет большое практическое значение. Несмотря на это, вопросам сложного напряжённого состояния конструкции уделено недостаточно внимания по причине трудоёмкости проведения испытаний, отсутствия подходящего оборудования и достаточного спектра аналитических решений подобных задач. Тем не менее в работах [7–9] приведены результаты экспериментальных исследований цилиндрических образцов из композитов в условиях сложного напряжённого состояния, в том числе на одноосное квазистатическое растяжение с дополнительными вибрациями.

Целью данного исследования является определение закономерности влияния дополнительных вибраций кручения как частного случая комплексных воздействий на характер деформирования и разрушения образцов из полимерного композиционного материала.

Объект исследования

В качестве материала для исследования процессов деформирования и разрушения был выбран полимерный стеклотекстолит марки СТЭФ. Он обладает высокой обрабатываемостью и технологичностью. Для исследования поведения материала нужно брать во внимание его структуру, которая может дать необходимые ответы на вопросы, связанные с полученными результатами.

Данный материал представляет собой слоистый пакет спрессованных друг с другом стеклотканей полотняного плетения толщиной порядка 0,2 мм, пропитанных термореактивной эпоксидно-фенолформальдегидной матрицей. Геометрия образцов, использованных в испытаниях, приведена на рис. 1, а, внешний вид образцов – на рис. 1, б.

По краям образца, как показано на рис. 1, вырезались V-образные концентраторы. Их расположение было обусловлено потребностью в процессе эксперимента реализации моды деформирования поперечного сдвига при кручении, а такая форма была необходима для достижения более высоких показателей напряжений в области концентраторов.

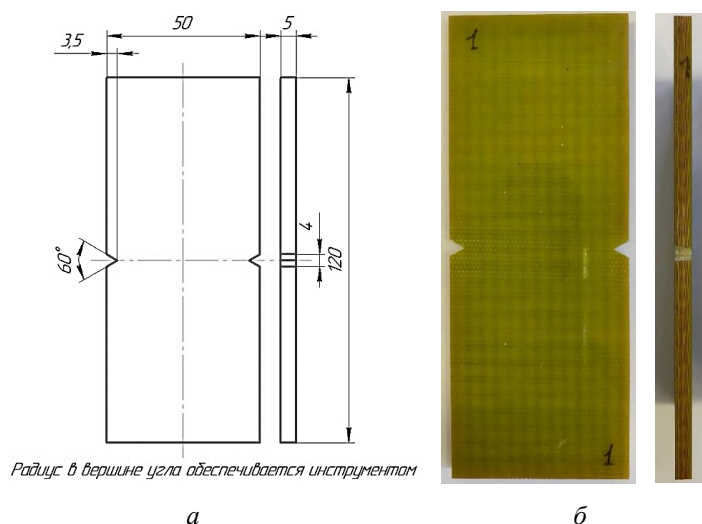


Рис. 1. Эскиз (а) и фотография (б) образцов

Механические свойства материала образцов взяты из работы [10] и отражены в табл. 1, где прочность на растяжение $X+1$, $Y+1$ и сжатие $X-1$, $Y-1$ вдоль соответствующих осей, а также прочность на сдвиг S_{xy} в плоскости XY .

Таблица 1

Механические свойства материала СТЭФ

Величина	Значение, ГПа	Величина	Значение	Прочность	Значение, МПа
$E_x = E_y$	28	ν_{xy}	0,18	$X_{+1} = Y_{+1}$	380
E_z	8	$\nu_{xz} = \nu_{yz}$	0,4	$X_{-1} = Y_{-1}$	240
G_{xy}	6,2	—	—	S_{xy}	205
$G_{xz} = G_{yz}$	3	—	—	—	—

Испытательное оборудование

Совместное действие растяжения и крутильных вибраций на пластинчатый образец с двумя краевыми V-образными концентраторами производилось на разрывной сервогидравлической испытательной машине марки INSTRON 8850, которая позволяет испытывать пластинчатые или цилиндрические (сплошные, полые) образцы одновременно в двух осях, прикладывая к телу растягивающие нагрузки и крутящий момент. Это обеспечивает деформирование образцов по двум модам: нормального отрыва (при растяжении) и поперечного сдвига (при кручении).

Методика проведения испытаний

Для получения необходимых результатов был составлен план (табл. 2), в соответствии с которым образцы подвергались заданными внешними воздействиями. Испытания были проведены на восьми образцах с одинаковой геометрией из одного и того же материала.

Таблица 2

План испытаний образцов

Номер образца	Нагружение				
	Выращивание усталостной трещины	Статика	«Циклика»	Параметры крутильных вибраций	
				Амплитуда, град.	Частота, Гц
1	–	Растяжение	–	–	–
2	Циклическое растяжение	Растяжение	–	–	–
3	–	Растяжение	Кручение	0,4	15
4	Циклическое растяжение	Растяжение	Кручение	0,4	15
5	–	Растяжение	Кручение	0,6	15
6	Циклическое растяжение	Растяжение	Кручение	0,6	15
7	–	Растяжение	Кручение	0,4	20
8	Циклическое растяжение	Растяжение	Кручение	0,4	20

Нагружение образцов осуществлялось с постоянной скоростью 0,4 мм/мин. Давление, действующее на образец в захватах испытательной машины, было равным 12 МПа. Все испытания проводились в помещении при температуре +22 °С и влажности 60 %.

На группе образцов предварительно выращивалась усталостная трещина порядка 5 мм с заданными параметрами циклического растяжения: частотой 10 Гц и амплитудой в 20 кН от 10 до 30 кН. Основной вид воздействия всех образцов – одноосное квазистатическое растяжение.

Обработка результатов

Для достижения поставленной выше цели рассматривалось влияние начальной предварительно выращенной усталостной трещины, наличие дополнительных вибраций, а также изменение значений амплитуды и частоты этих вибраций на протяжённость ниспадающего участка диаграммы нагружения выбранного материала.

По протяжённости участка закритической стадии деформирования можно судить о таких важных понятиях, как безопасность разрушения, а также

степень стабилизации равновесной трещины. Для численной оценки этих параметров были введены коэффициенты степени закритической стадии k и степени равновесного роста трещины r . Было принято, что для их расчёта достаточно знать значения нагрузки и перемещений в точках максимальных нагрузок и нагрузок при полном разрушении, т.е. потери целостности образца, что отражено в уравнениях

$$k = 1 - \frac{P_{\text{раз}}}{P_{\text{макс}}}; \quad (1)$$

$$r = \frac{U_{\text{раз}}}{U_{\text{макс}}}. \quad (2)$$

Коэффициент k определяет долю закритического участка деформирования на этапе разрушения материала. Значения коэффициента варьируются от 0 при совпадении максимальных нагрузок с разрушающими, закритическая стадия не реализуется, до 1, когда разрушающая нагрузка падает до нуля, реализация закритической стадии максимальна. Коэффициент степени закритической стадии показывает уровень безопасности разрушения при деформировании. Чем выше значение данного показателя, тем более безопасно протекает разрушение, так как в этом случае значения прикладываемых нагрузок меньше, что выражается в меньшей накопленной энергии в процессе деформирования.

Коэффициент r показывает, во сколько раз перемещения образца в момент разрушения больше перемещений при максимальной нагрузке. Значения коэффициента всегда больше 1. Коэффициент степени равновесного роста показывает уровень склонности деформирования образца к постоянной скорости движения трещин. Чем выше значение данного показателя, тем более протяжённый участок закритического деформирования по оси абсцисс (перемещений) и тем более равновесно протекает разрушение. В начальном моменте «закритики» возникают видимые образования трещин в материале, а при полном разрушении эти трещины становятся неконтролируемыми и не отображаются на диаграмме. Поэтому равновесный рост трещин можно наблюдать в виде участка на диаграмме нагружения.

Далее перейдём к интерпретации непосредственных результатов.

Влияние наличия предварительно выращенной трещины и вибраций

Как правило, в структуре тел ещё до этапа эксплуатации присутствуют различные повреждения. Они могут влиять на прочность, а также на процессы деформирования и разрушения. Поэтому рассмотрение процессов деформирования материалов с учётом начальных дефектов очень важно. В качестве начального дефекта в материале примем выращенную трещину циклическим растяжением. Сравним на основе значений коэффициентов k и r образцы без трещины и с трещиной. Кроме этого, рассмотрим влияние наличия вибраций

кручения. Результаты деформирования образцов приведены на рис. 2, а значения коэффициентов в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов k и r при наличии начальной трещины и дополнительных вибраций

Номер образца	Вид образца	k	r
1	без трещины, без вибраций	0,505	1,116
2	с трещиной, без вибраций	0,412	1,316
3	без трещины, с вибрациями	0,697	1,138
4	с трещиной, с вибрациями	0,611	1,270

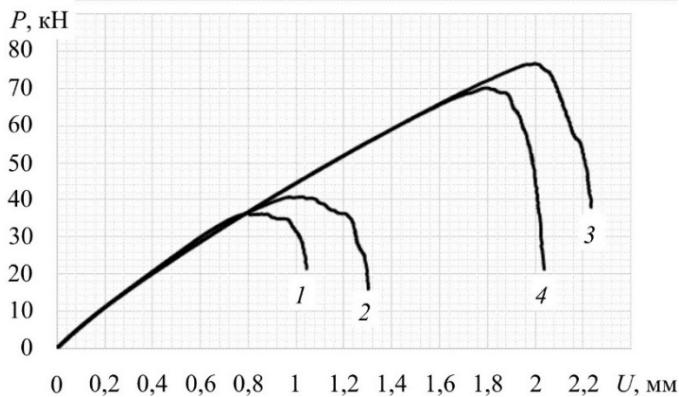


Рис. 2. Диаграммы нагружения образцов, влияние начальной трещины на деформирование тел с дополнительными воздействиями и без:

1 – с трещиной без вибраций; 2 – с трещиной с вибрациями;
3 – без трещины без вибраций; 4 – без трещины с вибрациями

Из табл. 3 и рис. 2 можно сделать следующие выводы:

– Ниспадающий участок диаграммы образца с трещиной *более* протяжённый по оси перемещений и *менее* – по оси усилий, как для тел с вибрациями, так и без них.

– Ниспадающий участок диаграммы образца с дополнительными вибрациями *более* протяжённый как по оси перемещений, так и по оси усилий в телах без начальных трещин.

– Ниспадающий участок диаграммы образца с дополнительными вибрациями *менее* протяжённый по оси перемещений и *более* – по оси усилий в телах с начальными трещинами.

Таким образом, трещина в теле снижает безопасность разрушения независимо от присутствия дополнительных вибраций. Лишние вибрации могут обеспечить более высокий показатель безопасности разрушения тел с

трещинами. А стабилизацию роста трещины можно повысить введением в материал начальных трещин.

Дополнительные крутильные вибрации в теле увеличивают безопасность разрушения независимо от наличия начальной трещины. Что касается стабилизации устойчивого роста трещины, то этому способствуют вибрации лишь в телах без трещин.

Влияние повышения амплитуды и частоты вибраций кручения

Кроме факта присутствия дополнительных вибраций, необходимо учесть влияние значений частоты и амплитуды колебаний вибрационных воздействий. Было рассмотрено три значения амплитуд – 0; 0,4; 0,6 градусов поворота при вибрационном кручении постоянной частотой 15 Гц и три значения частот – 0; 15; 20 Гц с постоянной амплитудой в 0,4 градуса для тел с начально выращенной трещиной и без.

Изменение амплитуды при постоянной частоте показано в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов k и r при повышении амплитуды вибраций

Номер образца	Вид образца	k	r
1	без трещины, без вибраций	0,505	1,116
3	без трещины, амплитудой 0,4 градуса	0,697	1,138
5	без трещины, амплитудой 0,6 градуса	0,633	1,208
2	с трещиной, без вибраций	0,412	1,316
4	с трещиной, амплитудой 0,4 градуса	0,611	1,270
6	с трещиной, амплитудой 0,6 градуса	0,584	1,205

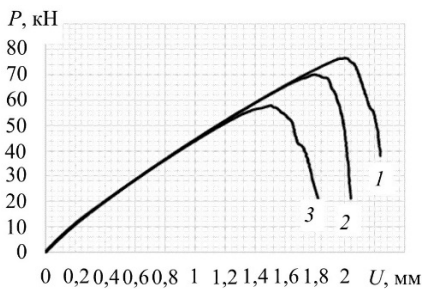


Рис. 3. Диаграммы нагружения, влияние амплитуды на деформирование тел без трещин: 1 – без вибраций; 2 – с вибрациями при амплитуде 0,4; 3 – с вибрациями при амплитуде 0,6

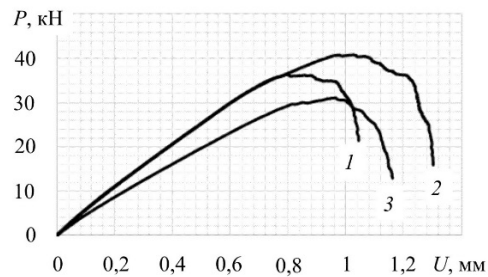


Рис. 4. Диаграммы нагружения, влияние амплитуды на деформирование тел с трещинами: 1 – без вибраций; 2 – с вибрациями при амплитуде 0,4; 3 – с вибрациями при амплитуде 0,6

Изменение частоты при постоянной амплитуде показано в табл. 5.

Значения коэффициентов k и r при повышении частоты вибраций

Номер образца	Вид образца	k	r
1	без трещины, без вибраций	0,505	1,116
3	без трещины, частотой 15 Гц	0,697	1,138
7	без трещины, частотой 20 Гц	0,668	1,151
2	с трещиной, без вибраций	0,412	1,316
4	с трещиной, частотой 15 Гц	0,611	1,270
8	с трещиной, частотой 20 Гц	0,489	1,169

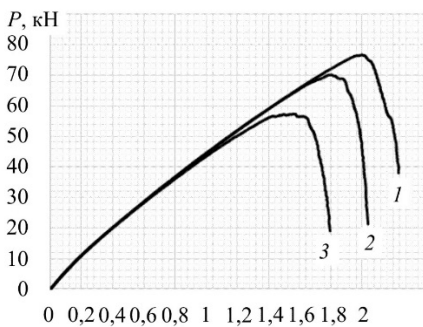


Рис. 5. Диаграммы нагружения, влияние частоты на деформирование тел без трещин: 1 – без вибраций; 2 – с вибрациями при 15 Гц; 3 – с вибрациями при 20 Гц

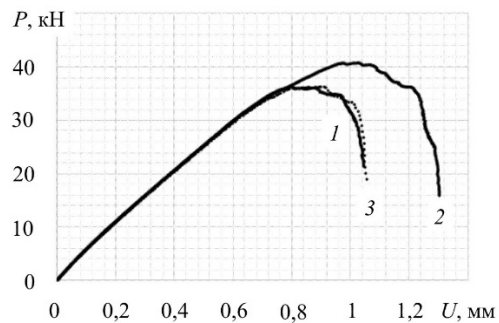


Рис. 6. Диаграммы нагружения, влияние частоты на деформирование тел с трещинами: 1 – без вибраций; 2 – с вибрациями при 15 Гц; 3 – с вибрациями при 20 Гц

Из табл. 4, 5 и рис. 3, 4, 5, 6 можно сделать следующие выводы:

– При повышении амплитуды или частоты вибраций увеличивается протяжённость ниспадающего участка диаграммы образца по оси перемещений для тел без трещин и уменьшается для тел с начальными трещинами.

– При повышении амплитуды или частоты вибраций протяжённость ниспадающего участка диаграммы образца по оси усилий как для тел без трещин, так и для тел с начальными трещинами снижается.

– Можно сказать, что повышение амплитуды или частоты способствует стабилизации роста трещин, но лишь в телах без предварительно выращенных трещин.

Результаты расчёта коэффициента реализации закритической стадии показали, что независимо от того, есть или нет в телах начальные трещины, безопасность разрушения тел будет выше при малых значениях амплитуд и частот. Насколько малых, по результатам данного исследования сказать трудно.

Заключение

В процессе работы было рассмотрено влияние наличия начальной усталостной трещины, дополнительных вибраций, а также повышения амплитуды и частоты вибраций на безопасность разрушения и стабилизацию устойчивого роста трещины.

В результате определено, что присутствие начальной трещины в образце обеспечивает стабилизацию её устойчивого роста, а дополнительные вибрации повышают уровень безопасности разрушения, но только при малых частотах и амплитудах.

Реализация действия вибраций малых амплитуд или частот и анализ поведения материала при этом будут рассмотрены автором в дальнейшем.

Список литературы

1. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 93–98.

2. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Мугатаров А.И. Моделирование процесса деформирования пластины с концентратором напряжений при учете закритической стадии деформирования материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 3. – С. 32–40.

3. Вильдеман В.Э., Бажуков П.С. Исследование влияния жесткости нагружающей системы при испытаниях цилиндрических образцов с проточкой // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл., Пермь, 24–27 февраля 2015 г. / отв. ред. Н.А. Юрлова; Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН. – Пермь, 2015. – С. 70.

4. Третьяков М.П. Изучение закономерностей закритического деформирования конструкционных сталей при различной жесткости нагружающей системы // Математическое моделирование в естественных науках. – 2014. – Т. 1. – С. 259–262.

5. Прочность при закритическом деформировании косоугольных композиционных панелей / Н.С. Азиков [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 5. – С. 62–71.

6. Феклистова Е.В., Вильдеман В.Э. Моделирование процессов закритического деформирования и разрушения тел с концентраторами различной геометрии // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: сб. материалов XII междунар. конф., Екатеринбург, 21–25 мая 2018 г.; Институт машиноведения Уро РАН. – Екатеринбург, 2018. – С. 413.

7. Вильдеман В.Э., Староверов О.А. Влияние дополнительных вибрационных воздействий на процессы деформирования и разрушения композиционных трубчатых образцов // XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: сб. тр.,

Москва, 02–04 декабря 2020 г.; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. – М., 2021. – С. 32–36.

8. Склемина О.Ю., Полилов А.Н. Методы испытаний плоских и трубчатых образцов из композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения: сб. тр., Москва, 07–09 ноября 2022 г.; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. – М., 2022. – С. 74–82.

9. Елисеев В.В., Елизаров Ю.М. Испытания трубчатых образцов в условиях сложного напряженного состояния // Техника машиностроения. – 2004. – № 2(48). – С. 59–63.

10. Жихарев М.В. Влияние предварительного нагружения на баллистические свойства стеклопластиковых панелей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 82–90.

Сведения об авторах

Гурджиев Арсений Валерьевич – студент гр. ЭКМ-22-1м, аэрокосмический факультет, кафедра «Экспериментальная механика», Пермский национальный политехнический университет, e-mail: gurd_20@mail.ru.

Научный руководитель **Третьяков Михаил Павлович** – кандидат физико-математических наук, аэрокосмический факультет, доцент кафедры «Экспериментальная механика», Пермский национальный политехнический университет, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru.

Научный руководитель **Вильдеман Валерий Эрвинович** – доктор физико-математических наук, аэрокосмический факультет, профессор кафедры «Экспериментальная механика», Пермский национальный политехнический университет, e-mail: wildemann@pstu.ru.

Финансирование: Работа была выполнена в Пермском национальном университете при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00765).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: 100 %

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Гурджиев, А.В. Исследование влияния дополнительных вибраций кручения на сверхкритическую стадию деформирования волокнистого полимерного композиционного материала / А.В. Гурджиев, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман // *Master's Journal*. – 2023. – № 1. – Art. № 11.

Please cite this article in English as: Gurdjiev A.V., Tretyakov M.P., Vildeman V.E. Study of the influence of additional torsional vibrations on the supercritical stage of deformation of a fibrous polymer composite material. *Master's journal*, 2023. no. 1, art. no. 11.