



## МЕТОД ИСПЫТАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА УСТАЛОСТЬ ПРИ СДВИГЕ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ НАГРУЖЕНИЯ

Демчишин А.В., Пальчиков Д.С.

*ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены методы экспериментального определения статической прочности при сдвиге у полимерных композиционных материалов. Выделены их преимущества и недостатки. Отмечены границы их применимости. В качестве метода, схему нагружения и закрепления образца которого можно адаптировать для испытания на сдвиг на усталость при любых коэффициентах асимметрии цикла, в том числе и при симметричном цикле нагружения, выбран метод Иосипеску (ASTM D5379/D5379M-12). Главными критериями, по которым был сделан выбор, являются: создание чистой и равномерной рабочей зоны, возможность проведения усталостных испытаний для всех трёх направлений сдвига  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ , возможность проведения усталостных испытаний при разных коэффициентах асимметрии. Современные испытательные оснастки, выполненные по ASTM D5379/D5379M-12, не позволяют проводить усталостные испытания при симметричном цикле нагружения. В связи с этим, сформированы требования к испытательной оснастке. Показаны недостатки геометрии образца и схемы нагружения, преодоление которых предполагается за счёт конструктивного исполнения испытательной оснастки. Указано, что равномерная рабочая зона в образце достигается при расстоянии между V-образными вырезами, равном 60% от общей толщины образца. Среди недостатков отмечают: смятие образца по торцам, образование трещин, исходящих из V-образного концентратора, воздействие на образец в процессе испытания изгибающего и внеплоскостного момента. Отдельным преимуществом выделяется возможность проведения испытания при повышенной температуре (до 400°C). Оценка общей жёсткости оснастки проведена с помощью конечных элементарных моделей. Кондиционность усталостного разрушения образцов необходимо подтверждать экспериментально.

**Ключевые слова:** прочность; усталость; полимерные композиционные материалы; межслоевой сдвиг; метод Иосипеску; метод короткой балки; оснастка

## METHOD FOR TESTING POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR SHEAR FATIGUE DURING A SYMMETRICAL LOADING CYCLE

Demchishin A.V., Palchikov D.S.

*Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia*

## ABSTRACT

The methods of experimental determination of static shear strength in polymer composite materials are considered. Their advantages and disadvantages are highlighted. The limits of their applicability are marked. The Iosipescu method (ASTM D5379/D5379M-12) was chosen as a method, the scheme of loading and fastening of the sample of which can be adapted for fatigue shear testing at any cycle asymmetry coefficients, including a symmetrical loading cycle. The main criteria by which the choice was made are: the creation of a clean and uniform working area, the possibility of conducting fatigue tests for all three shear directions  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ , the possibility of conducting fatigue tests at different coefficients of asymmetry. Modern test rigs made according to ASTM D5379/D5379M-12 do not allow fatigue tests to be carried out with a symmetrical loading cycle. In this regard, the requirements for the test equipment have been formed. The disadvantages of the geometry of the sample and the loading scheme are shown, which are supposed to be overcome due to the constructive design of the test equipment. It is indicated that a uniform working area in the sample is achieved when the distance between the V-shaped cutouts is equal to 60% of the total thickness of the sample. Among the disadvantages are noted: the crumpling of the sample at the ends, the formation of cracks emanating from the V-shaped concentrator, the impact of bending and out-of-plane moment on the sample during the test. A separate advantage is the possibility of testing at elevated temperatures (up to 400°C). The assessment of the overall rigidity of the tooling was carried out using finite elementary models. The conditioning of fatigue failure of samples must be confirmed experimentally.

**Keywords:** strength; fatigue; epoxy carbon; interlaminar shear; Iosipescu method; short beam method

## ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон (УПКМ) широко используются во многих областях благодаря их высоким удельным характеристикам [1]. В частности, УПКМ не остались без внимания в авиационном двигателестроении [2].

Проектирование современных деталей из УПКМ, таких как рабочая лопатка вентилятора для двигателей с большой степенью двухконтурности, межлопаточная вставка, невозможно без учёта усталостных характеристик материала.

В связи с анизотропией свойств композитов инженеры сталкиваются с трудностями численного моделирования усталости, поэтому эксперименты по-прежнему являются доминирующим подходом к изучению усталостного поведения композитов.

Сопротивление усталости при сдвиге является одной из критических характеристик УПКМ. Кроме того, опыт проектирования конструкций из УПКМ показывает необходимость получения диаграммы Гудмана. Диаграмма Гудмана показывает влияние среднего уровня напряжений на долговечность. Для её построения необходимо проводить испытания материала при различных коэффициентах асимметрии  $R$ , в том числе при  $R = -1$  (симметричный цикл нагружения).

Надёжное использование УПКМ в конструкциях авиационных двигателей без исследования усталостной прочности при сдвиге не представляется возможным. В связи с этим, целью работы является разработка метода испытаний УПКМ на усталость при сдвиге при симметричном цикле нагружения. Разработка

метода сопровождается созданием оснастки, позволяющей испытывать материалы при любых коэффициентах асимметрии.

Для достижения цели в работе выполнен обзор методов испытания, проведено их сравнение, выделены преимущества и недостатки, сформированы требования к образцам и испытательной оснастке, обосновано конструктивное исполнение оснастки.

## 1. ОБЗОР И ВЫБОР МЕТОДА ИСПЫТАНИЯ

Большинство исследований усталостных характеристик сосредоточены на усталости композитов при растяжении, сжатии или изгибе. Сравнительно немного исследований направлено на усталостные свойства ламинатов при межслоевом сдвиге при различных коэффициентах асимметрии цикла и уровнях нагружения.

Экспериментальное исследование УПКМ под действием усталостного нагружения при сдвиге гораздо сложнее, чем при растяжении или сжатии из-за трудностей, вызванных подготовкой образцов и их закреплением (в экспериментальной оснастке).

Существует множество экспериментальных методов, которые могут создать напряженное состояние сдвига в композитных материалах (Таблица 1) [3-5].

Таблица 1.

Сравнение методов испытания композитных материалов на сдвиг.

Наименование метода	Равномерное состояние сдвига	Практичность применения для $\tau_{xy}$ , $\tau_{xz}$ , $\tau_{yz}$	Определения предела прочности	Определения модуля упругости
Метод короткой балки (D 2344)			+	
Метод Иосипеску (D 5379)	+	+	+	+
Растяжение полоски с укладкой $\pm 45^\circ$ (D 3518)			+	+
Двухрельсовый сдвиг (D 4255)			+	+
Трехрельсовый сдвиг (D 4255)			+	+
Растяжение образца с поперечными надрезами (D 3846)			+	+
Кручение тонкостенной трубы (D 5448)			+	+
Кручение стержня			+	+
Четырехточечный сдвиг			+	
Сдвиг рамой			+	+
Изгиб пластины			+	+
Растяжение полоски с укладкой $\pm 10^\circ$			+	+
Рельсовый сдвиг с V-образными вырезами			+	+

Например, «метод Иосипеску» [6,7], растяжение полосы с укладкой  $\pm 45^\circ$  [8], «рельсовый срез» [9-11], «сдвиг короткой балки» [12,13], асимметричный четырёхточечный изгиб [14]. Большинство исследователей пришли к согласию, что самым подходящим методом для определения свойств при сдвиге полимерных композиционных материалов (ПКМ) является метод Иосипеску [15]. Например, в работе [16] сравнили метод «сдвиг короткой балки», двухрельсовый сдвиг, и четырёхточечный изгиб и пришли к выводу, что метод Иосипеску наиболее подходящий и достоверный при определении сдвиговых свойств. А в работе [17] провели оба испытания: методом Иосипеску и растяжением полосы с укладкой  $\pm 45^\circ$ . В результате определили, что метод Иосипеску превосходил метод растяжения полосы благодаря созданию чистого напряжённого состояния сдвига по всей поверхности по сравнению с двухосным распределением напряжения.

В целом, можно выделить следующие преимущества метода Иосипеску: высокая точность, относительная простота, чистое напряжённое состояние сдвига в рабочей зоне образца, возможность применения для определения характеристик УПКМ как при сдвиге в плоскости слоя, так и при межслоевом сдвиге, кроме того, применяемая схема нагружения и закрепления образца позволяет адаптировать данный метод к испытаниям УПКМ на сдвиг при симметричном цикле нагружения ( $R=1$ ).

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ОСНАСТКЕ

Для реализации схемы нагружения по методу Иосипеску и достижения чистого напряжённо-деформированного состояния (НДС) в рабочей зоне образца необходимо предъявить требования как к испытательной оснастке, так и к самому образцу.

Так в работе [18] указывают на некоторые недостатки геометрии образца, главными из которых являются: смятие материала на торцах и образование продольных трещин, выходящих из V-образных вырезов (рис.1).

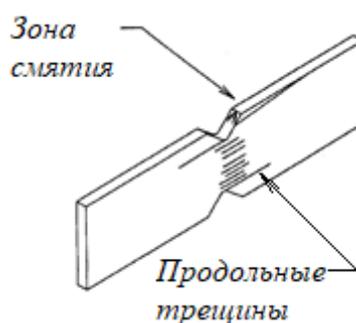


Рис.1. Зона смятия и продольные трещины.

Однако в работе [19] исследование образования продольных трещин, исходящих из V-образных вырезов провели с помощью системы корреляции цифровых изображений (рис.2). На рис.2а,b,c,d показаны перераспределения деформаций по мере увеличения нагрузки. Рис.2а соответствует начальной стадии нагружения. В этот момент времени материал находится в линейной области, и поле деформаций равномерно распределено в рабочей зоне, выровненной между V-образными вырезами. Далее, по мере увеличения нагрузки (рис.2а,b) зона максимальных напряжений смещается из-за образования трещин, исходящих

из концентраторов V-образных вырезов. Наконец, зона максимума возвращается к центру образца (рис.2d). Таким образом, в линейной зоне поведения материала продольные трещины не появляются. Вопрос образования трещин в процессе усталостного испытания не освещается.

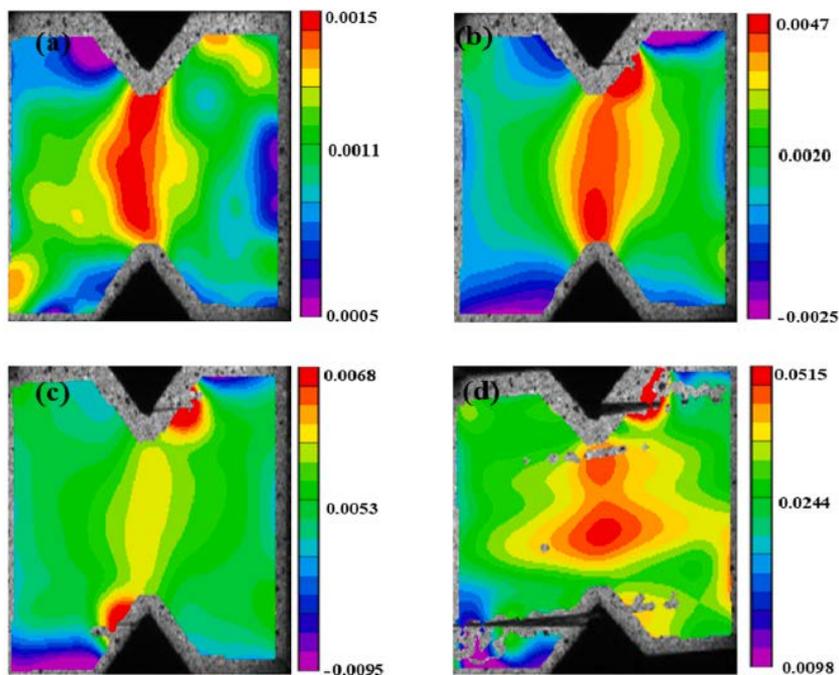


Рис.2. Изменение распределения деформаций сдвига после образования продольных трещин, исходящих из V-образных вырезов.

В работе [20] рассмотрены разные варианты исполнения граничных поверхностей с точки зрения уменьшения напряжения смятия в образце (рис.3). Предложенные геометрии не решают полностью проблему, но снижают вероятность получения некондиционных результатов. Также во избежание смятия предлагается приклеивать образец к прижимным губкам.

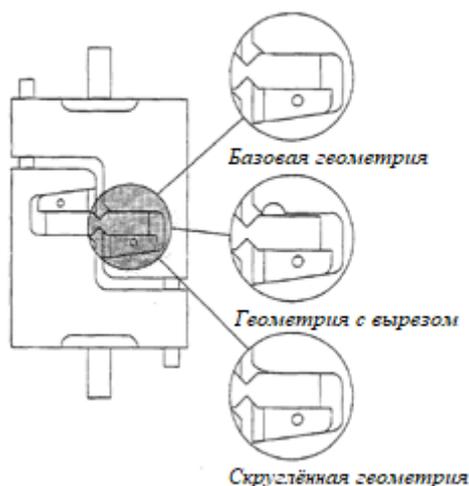


Рис.3. Варианты геометрии граничных поверхностей.

Похожее решение рассмотрено в работе [21], где предлагается использовать клейкую ленту на длинных краях образцов, чтобы уменьшить его скручивание,

а также применять поправочный коэффициент для измеренного модуля сдвига. Поправочный коэффициент призван компенсировать пересчётом геометрическое несовершенство образца.

Опыт использования оснасток по методу Иосипеску требует обеспечения жёсткости всей системы, что достигается как за счёт жёсткости системы крепления к испытательной машине, так и за счёт жёсткости самой оснастки, дополнительных направляющих и их исполнения.

В работе [22] рассматривается влияние внеплоскостного момента для оснастки с одной цилиндрической направляющей (рис.4). Делаются выводы о необходимости изменения крепления для реализации правильного нагружения и предотвращения воздействия на образец дополнительного момента. При этом предлагается использовать одну центральную направляющую, расположенную по оси нагружения.

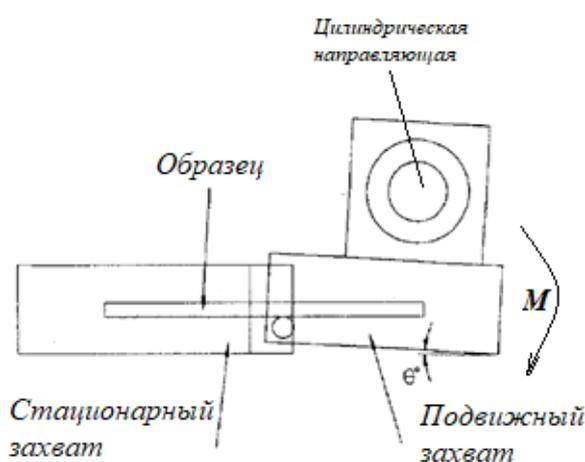


Рис.4. Появление внеплоскостного момента в оснастке с одной цилиндрической направляющей.

Исполнение оснастки с двумя направляющими скольжения представлено в работе [19] (рис.5). При этом трение скольжения, возникающее в направляющих, никак не компенсируется. Поэтому в этой же работе указывается на необходимость учёта трения в формулах пересчёта нагрузки. О проблеме возникновения дополнительного трения сообщается и в работе [21].

В работе [23] указывается на необходимость создания достаточно жёсткой оснастки во избежание недопустимого изгиба образца (рис.6).

Проблему появления внеплоскостного момента приходится преодолевать авторам из-за выбора конструкции с зажатием образца с фронта оснастки (рис.7), по типу крепления, как предложено в ASTM D7078. Зажатие происходит только с одной стороны, что в свою очередь накладывает дополнительные требования к жёсткости всей оснастки. Выбор такой конструкции авторы обосновывают лёгкостью крепления образца.

В работе [3] показаны результаты усталостных испытаний при двух коэффициентах асимметрии цикла нагружения ( $R = 0,5$  и  $R = 1$ ). Приводится трехмерная модель испытательной оснастки (рис.8). Отметим, что в данном исполнении нет направляющих, ограничивающих перемещение захватов. Точность системы определяется жёсткостью нижней и верхней траверсы испытательной машины. Кроме того, прижим осуществляется двумя потаёнными винтами, что вынуждает испытателя контролировать момент затяжки.

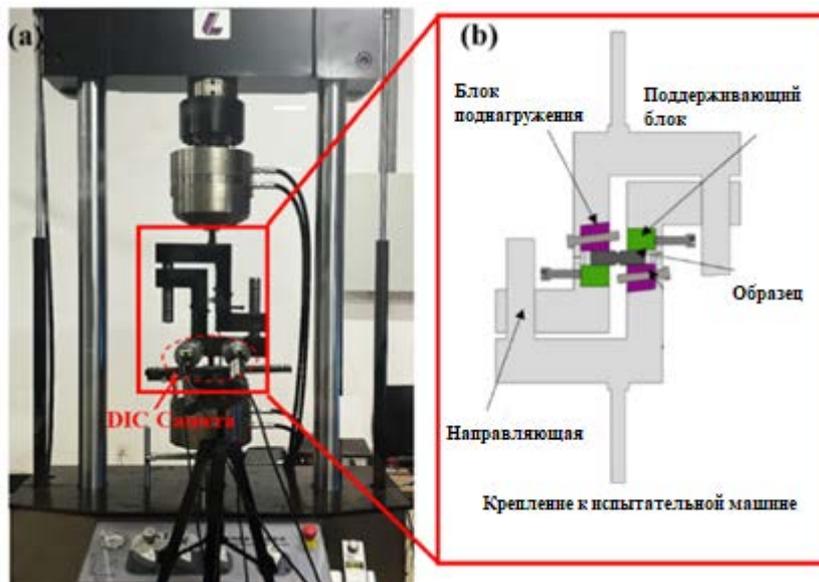


Рис.5. Фото и схема варианта исполнения оснастки с двумя направляющими скольжения.

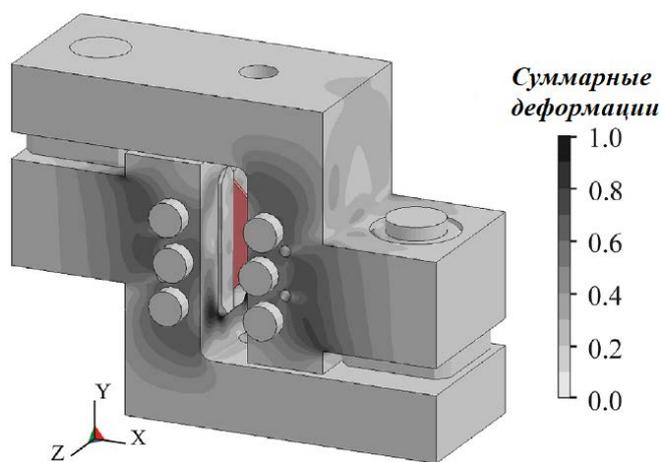


Рис.6. Анализ деформаций оснастки.

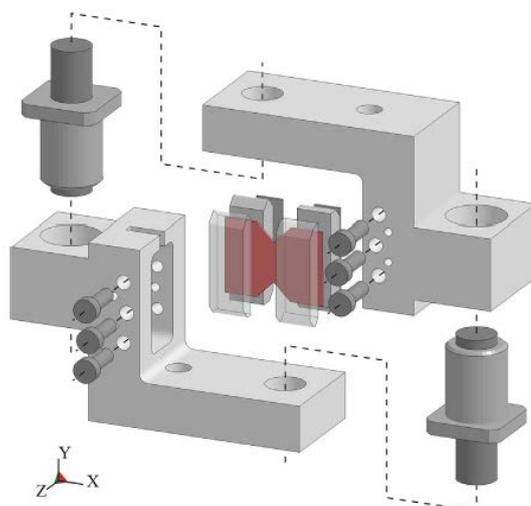


Рис.7. Конструкция оснастки с зажатием образца с фронта оснастки.

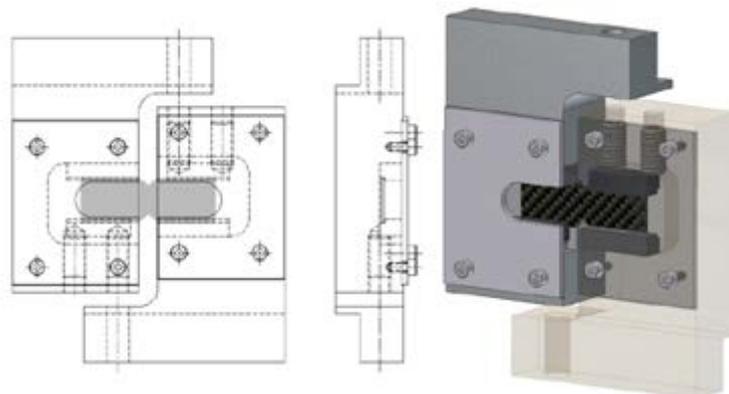


Рис.8. Реализация оснастки без направляющих.

Вместе с этим, для примера на рис.9-11 приведены варианты исполнения оснастки для статических испытаний ПКМ методом Иосипеску, заимствованные из открытых источников.

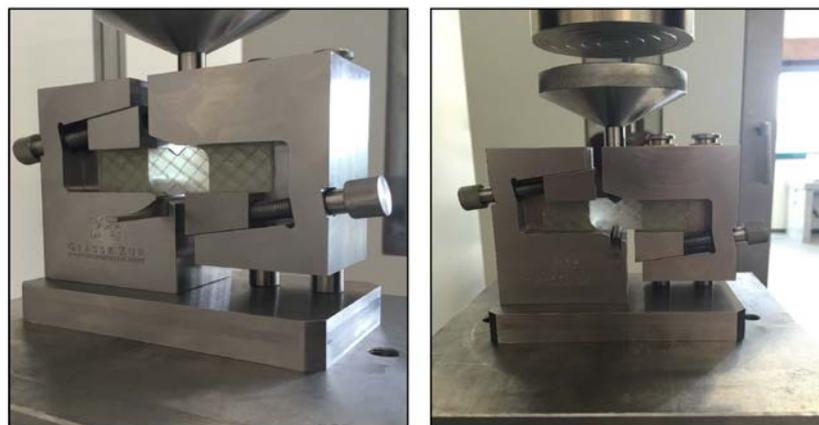


Рис.9. Пример исполнения оснастки.



Рис.10. Пример исполнения оснастки.



Рис.11. Пример исполнения оснастки.

В оснастках, изображённых на рис.9-10, применяются две направляющие скольжения, расположенные вне оси нагружения. При этом скольжение осуществляется через линейные подшипники качения. В оснастке на рис.10 применяется верхняя крышка для повышения общей жёсткости. В обоих случаях испытывать материалы с циклом «растяжение-сжатие» ( $R < 0$ ) не представляется возможным.

В конструкции оснастки, изображенной на рис.11, используются те же линейные подшипники скольжения, при этом данное исполнение (рис.11) лишено недостатка предыдущих двух (рис.9,10). Крепление верхнего и нижнего винта позволяет дополнительно контролировать соосность всей системы, включая испытательную машину. Крепление подшипников скольжения может позволять контролировать зазоры за счёт изменения усилия затяжки, что может оказаться полезным при испытании на различных температурах. Однако такое исполнение не позволяет испытывать материал при различных коэффициентах асимметрии цикла нагружения.

### 3. ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦА

В стандарте ASTM D5379/D5379M-12 от 2012 года предлагается геометрия образца с расстоянием между V-образными вырезами  $W = 11,4$  мм, высота образца  $d_1 = 19$  мм (рис.12).

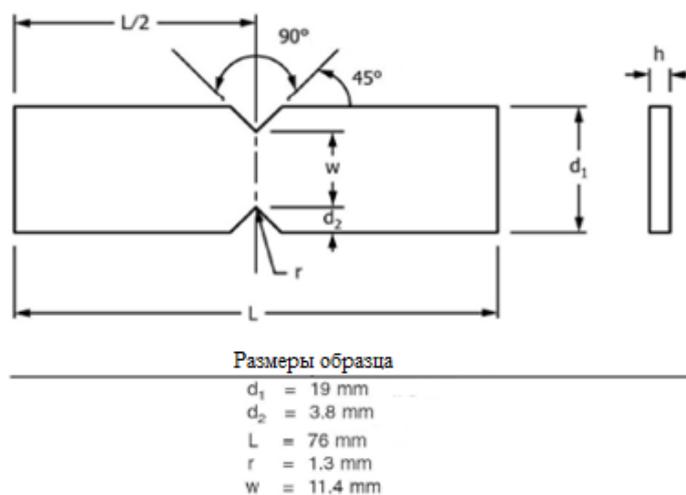


Рис.12. Геометрия образца из ASTM D5379.

При этом в D5379/D5379M-12 от 2005 года расстояние между V-образными вырезами предлагается равным  $W = 12$  мм,  $d_1 = 20$  мм при неизменности остальных размеров. В ГОСТ Р 56799-2015 приведены те же размеры, что и ASTM D5379 от 2005 г., где  $W = 12$  мм,  $d_1 = 20$  мм.

В работе [24] геометрия образца была исследована с помощью конечных элементарных (КЭ) моделей. Показано, что оптимальное НДС достигается при расстоянии между V-образными вырезами равном 60% от общей толщины образца. Таким образом, во всех трех вариантах стандарта выбор размеров образца справедлив.

#### 4. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТОРСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ ОСНАСТКИ

Из проведённого анализа литературы были сформулированы требования к испытательной оснастке. Конструкция испытательной оснастки должна:

- предотвращать воздействие на образец внеплоскостного момента;
- предотвращать воздействие на образец изгибающего момента;
- обеспечивать НДС чистого сдвига в рабочей зоне образца на протяжении всей длительности испытания;
- минимизировать явление смятия по торцам образцов;
- позволять проводить испытания при повышенных температурах (до 400°C);
- позволять использовать образцы с увеличенной толщиной (до 20 мм);
- иметь сменные прижимные блоки для изменения граничных условий нагружения или схемы испытания;
- позволять реализовывать симметричный цикл нагружения по типу «растяжение-сжатие» ( $R < 0$ ).

В результате конструкторской проработки авторами предлагается следующее исполнение оснастки (рис.13).

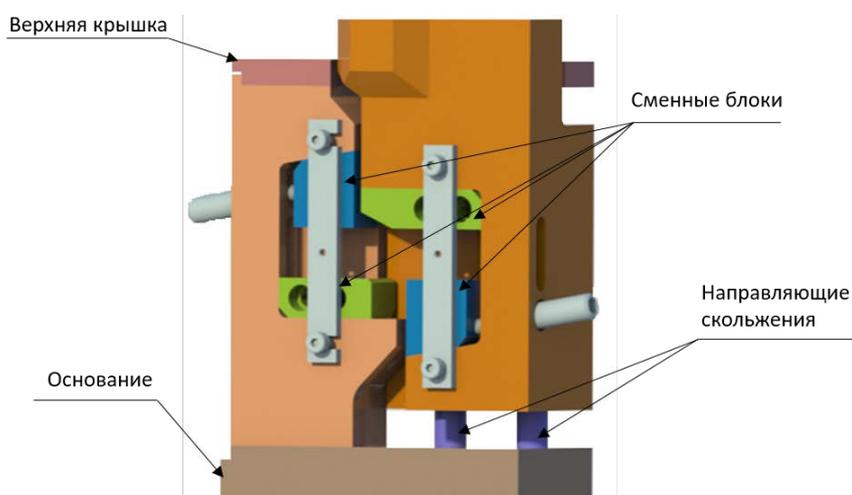


Рис.13. Вид испытательной оснастки с двумя направляющими на подшипниках скольжения.

Внеплоскостной момент компенсируется за счёт двух направляющих скольжения, расположенных вне оси нагружения. Изгибающий момент

предотвращается за счёт увеличения общей толщины оснастки до 70 мм. Общая жёсткость системы повышается за счёт верхней крышки.

Увеличенная толщина позволяет испытывать образцы толщиной до 20 мм. Такое решение полезно как с точки зрения увеличения жёсткости оснастки, так и в исследовательских целях: позволяет экспериментально определить оптимальную толщину образца. Повышенная толщина образца позволит избежать разрушения смятием.

Несмотря на то, что при испытании в оснастке с подшипниками скольжения требуется учёт трения, был выбран именно этот вариант из-за имеющегося опыта работы с такими подшипниками, а также в связи с их доступностью на рынке. Кроме того, дополнительным преимуществом является тот факт, что на подшипниках скольжения можно проводить испытания при повышенных и пониженных температурах (до 400°C) без риска заклинивания.

Сменные блоки позволяют изменять граничные условия нагружения или схемы испытания, что также необходимо для исследовательских целей.

Оценка общей жёсткости оснастки проведена с помощью конечных элементарных моделей (рис.14). Более высокие напряжения соответствуют более светлой области на изображениях. Эпюра сдвиговых деформаций коррелирует с приведённым ранее исследованием (рис.2). При этом концентрации напряжений у V-образных вырезов и на контактных поверхностях подтверждают недостатки геометрии (рис.1). Кондиционность усталостного разрушения образцов необходимо подтвердить экспериментально.

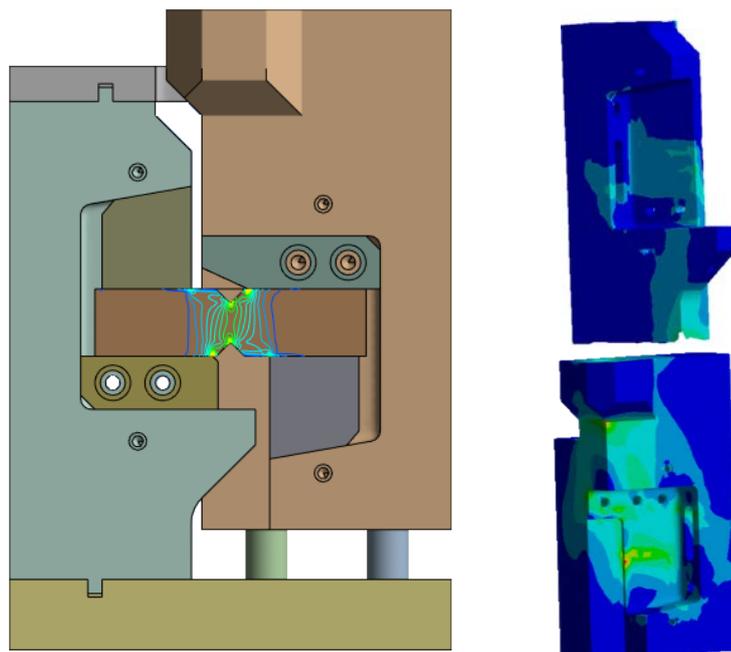


Рис.14. Эпюра деформаций сдвига на образце вместе с распределением напряжений в оснастке.

## ВЫВОДЫ

Определение усталостной долговечности при сдвиге при симметричном цикле нагружения у полимерных композиционных материалов необходимо для надёжного использования УПКМ в конструкциях двигателей летательных аппаратов.

Для реализации надёжного определения усталостных характеристик при сдвиге разработана испытательная оснастка: выполнены обзор методов испытания и их сравнение, выделены их преимущества и недостатки; сформированы требования к геометрии образцов и испытательной оснастке, выполнено детальное обоснование конструктивного исполнения оснастки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Alam P., Mamalis D., Robert C., Floreani C., Ó Brádaigh C.M. *The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – A review* // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol.166. – Pp.555-579.
2. Козлов А.Л., Палкин В.А. *Перспективы развития авиационного двигателестроения* // Авиационные двигатели. – 2023. – №1. – С.13-30.
3. Gonçalves V.O., Pardini L.C., Ancelotti Jr.A.C. *Fatigue under Shear Stress by Using the Iosipescu Method for Carbon/Epoxy Composites* // Advanced Engineering Forum. – 2017. – Vol.20. – Pp.22-28.
4. Жигун В.И., Плуме Э.З., Муйжниекс К.И., Краснов Л.Л. *Простые и надёжные методы определения модулей сдвига конструкционных материалов* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2019. – Т.25. – №4. – С.473-491.
5. Tarnopol'skii Yu.M., Arnautov A.K., Kulakov V.L. *Methods of determination of shear properties of textile composites* // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol.30. – Iss.7. – Pp.879-885.
6. Pindera M.J., Ifju P., Post D. *Iosipescu shear characterization of polymeric and metal matrix composites* // Experimental Mechanics. – 1990. – Vol.30. – Iss.1. – Pp.101-108.
7. Hussain A.K., Adams D.F. *The Wyoming-Modified Tworail Shear Test Fixture for Composite Materials* // J. Compos. Technol. Res. – 1999. – Vol.21. – No.4. – Pp.215-223.
8. Gliesche K., Hübner T., Orawetz H. *Investigations of in-plane shear properties of  $\pm 45^\circ$ -carbon/epoxy composites using tensile testing and optical deformation analysis* // Composites Science and Technology. – 2005. – Vol.65. – Iss.2. – Pp.163-171.
9. Rouault T., Bouvet C., Nègre V., Rauch P. *Reversible Rail Shear Apparatus Applied to the Study of Woven Laminate Shear Behavior* // Experimental Mechanics. – 2013. – Vol.53. – Iss.8. – Pp.1437-1448.
10. De Baere I., Van Paeppegem W., Degrieck J. *Design of a modified three-rail shear test for shear fatigue of composites* // Polymer Testing. – 2008. – Vol.27. – Iss.3. – Pp.346-359.
11. Di Ilio A., Di Genova L.G., Stamopoulos A.G. *Implementation of the Modified V-Notched Rail Shear Method for Characterizing Glass Fibre Thermoplastic Composites at Sub-Zero and Elevated Temperatures* // Polymer Testing. – 2020. – Vol.93. – 106874.
12. Abali F., Pora A., Shivakumar K. *Modified Short Beam Shear Test for Measurement of Interlaminar Shear Strength of Composites* // Journal of Composite Materials. – 2003. – Vol.37. – No.5. – Pp.453-464.
13. Полилов А.Н., Власов Д.Д., Татусь Н.А. *Уточнённый метод оценки модуля межслойного сдвига по поправке к прогибу образцов из полимерных*

компози́тов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2023. – Т.89. – №3. – С.57-69.

14. Theotokoglou E.E., Sideridis E. *Study of composite beams in asymmetric four-point bending* // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2011. – Vol.30. – Iss.13. – Pp.1125-1137.
15. Stojcevski F., Hilditch T., Henderson L.C. *A modern account of Iosipescu testing* // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Vol.107. – Pp.545-554.
16. Adams D., Lewis E. *Experimental assessment of four composite material shear test methods* // J. Test. Eval. – 1997. – Vol.25. – Pp.174-181.
17. Choi J.-H., Jang J., Shim W., Cho J.-M., Yoon S.-J., Choi C.-H. et al. *Determination of the in-plane shear modulus of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics using digital image correlation and finite-element analysis* // Composite Structures. – 2019. – Vol.229. – 111392.
18. Adams D.F., Lewis E.Q. *Experimental strain analysis of the Iosipescu shear test specimen* // Experimental Mechanics. – 1995. – Vol.35. – Iss.4. – Pp.352-360.
19. Zuxiang Lei, Gan Luo, Weikang Sun, Yawei Dong, Zhifei Tan, Yun Wan, Binbin Yin. *Exploring the Iosipescu method to investigate interlaminar shear fatigue behavior and failure mechanisms of carbon fiber reinforced composites* // International Journal of Fatigue. – 2024. – Vol.178. – 108020.
20. Tew B.W., Odom E.M., Teel J.D. *Composite specimen bearing failure reduction in Iosipescu shear tests* // Experimental Mechanics. – 2001. – Vol.41. – Iss.3. – Pp.218-224.
21. *NASA Technical Reports Server (NTRS) 19920022322: An experimental procedure for the Iosipescu composite specimen tested in the modified Wyoming fixture.*
22. Odom E.M., Blackletter D.M., Suratno B.R. *Experimental and analytical investigation of the modified wyoming shear-test fixture* // Experimental Mechanics. – 1994. – Vol.34. – Iss.1. – Pp.10-15.
23. Gude M., Hufenbach W., Andrich M., Mertel A., Schirner R. *Modified V-notched rail shear test fixture for shear characterisation of textile-reinforced composite materials* // Polymer Testing. – 2015. – Vol.43. – Pp.147-153.
24. Morton J., Ho H., Tsai M.Y., Farley G.L. *An Evaluation of the Iosipescu Specimen for Composite Materials Shear Property Measurement* // Journal of Composite Materials. – 1992. – Vol.26. – Iss.5. – 708.

## REFERENCES

1. Alam P., Mamalis D., Robert C., Floreani C., Ó Brádaigh C.M. *The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – A review*. Composites Part B: Engineering, 2019, Vol.166, Pp.555-579.
2. Kozlov A.L., Palkin V.A. *Perspektivy razvitiya aviatsionnogo dvigatelestroeniya [Development prospects of aircraft engine-building]*. Aviatsionnye dvigateli, 2023, No.1, Pp.13-30.
3. Gonçalves V.O., Pardini L.C., Ancelotti Jr.A.C. *Fatigue under Shear Stress by Using the Iosipescu Method for Carbon/Epoxy Composites*. Advanced Engineering Forum. 2017. Vol.20. Pp.22-28.
4. Zhigun V.I., Plume E.Z., Mujzhnieks K.I., Krasnov L.L. *Prostye i nadyozhnye metody opredeleniya modulej sdviga konstruktsionnykh materialov [Simple and reliable methods for determining shear modulus of structural materials]*.

- Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2019, Vol.25, No.4, Pp.473-491.
5. Tarnopol'skii Yu.M., Arnautov A.K., Kulakov V.L. *Methods of determination of shear properties of textile composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, Vol.30, Iss.7, Pp.879-885.
  6. Pindera M.J., Ifju P., Post D. *Iosipescu shear characterization of polymeric and metal matrix composites*. Experimental Mechanics, 1990, Vol.30, Iss.1, Pp.101-108.
  7. Hussain A.K., Adams D.F. *The Wyoming-Modified Tworail Shear Test Fixture for Composite Materials*. J. Compos. Technol. Res., 1999, Vol.21, No.4, Pp.215-223.
  8. Gliesche K., Hübner T., Orawetz H. *Investigations of in-plane shear properties of  $\pm 45^\circ$ -carbon/epoxy composites using tensile testing and optical deformation analysis*. Composites Science and Technology, 2005, Vol.65, Iss.2, Pp.163-171.
  9. Rouault T., Bouvet C., Nègre V., Rauch P. *Reversible Rail Shear Apparatus Applied to the Study of Woven Laminate Shear Behavior*. Experimental Mechanics, 2013, Vol.53, Iss.8, Pp.1437-1448.
  10. De Baere I., Van Paeppegem W., Degrieck J. *Design of a modified three-rail shear test for shear fatigue of composites*. Polymer Testing, 2008, Vol.27, Iss.3, Pp.346-359.
  11. Di Ilio A., Di Genova L.G., Stamopoulos A.G. *Implementation of the Modified V-Notched Rail Shear Method for Characterizing Glass Fibre Thermoplastic Composites at Sub-Zero and Elevated Temperatures*. Polymer Testing, 2020, Vol.93, 106874.
  12. Abali F., Pora A., Shivakumar K. *Modified Short Beam Shear Test for Measurement of Interlaminar Shear Strength of Composites*. Journal of Composite Materials, 2003, Vol.37, No.5, Pp.453-464.
  13. Polilov A.N., Vlasov D.D., Tatus' N.A. *Utochnennyj metod otsenki modulya mezhslonjnego sdviga po popravke k progibu obraztsov iz polimernykh kompozitov [A refined method for estimating the interlayer shear modulus by correcting for deflection of polymer composite samples]*. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov, 2023, Vol.89, No.3, Pp.57-69.
  14. Theotokoglou E.E., Sideridis E. *Study of composite beams in asymmetric four-point bending*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, Vol.30, Iss.13, Pp.1125-1137.
  15. Stojcevski F., Hilditch T., Henderson L.C. *A modern account of Iosipescu testing*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, Vol.107, Pp.545-554.
  16. Adams D., Lewis E. *Experimental assessment of four composite material shear test methods*. J. Test. Eval., 1997, Vol.25, Pp.174-181.
  17. Choi J.-H., Jang J., Shim W., Cho J.-M., Yoon S.-J., Choi C.-H. et al. *Determination of the in-plane shear modulus of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics using digital image correlation and finite-element analysis*. Composite Structures, 2019, Vol.229, 111392.
  18. Adams D.F., Lewis E.Q. *Experimental strain analysis of the Iosipescu shear test specimen*. Experimental Mechanics, 1995, Vol.35, Iss.4, Pp.352-360.
  19. Zuxiang Lei, Gan Luo, Weikang Sun, Yawei Dong, Zhifei Tan, Yun Wan, Binbin Yin. *Exploring the Iosipescu method to investigate interlaminar shear fatigue behavior and failure mechanisms of carbon fiber reinforced composites*. International Journal of Fatigue, 2024, Vol.178, 108020.

20. Tew B.W., Odom E.M., Teel J.D. *Composite specimen bearing failure reduction in Iosipescu shear tests*. Experimental Mechanics, 2001, Vol.41, Iss.3, Pp.218-224.
21. *NASA Technical Reports Server (NTRS) 19920022322: An experimental procedure for the Iosipescu composite specimen tested in the modified Wyoming fixture*.
22. Odom E.M., Blackketter D.M., Suratno B.R. *Experimental and analytical investigation of the modified wyoming shear-test fixture*. Experimental Mechanics, 1994, Vol.34, Iss.1, Pp.10-15.
23. Gude M., Hufenbach W., Andrich M., Mertel A., Schirner R. *Modified V-notched rail shear test fixture for shear characterisation of textile-reinforced composite materials*. Polymer Testing, 2015, Vol.43, Pp.147-153.
24. Morton J., Ho H., Tsai M.Y., Farley G.L. *An Evaluation of the Iosipescu Specimen for Composite Materials Shear Property Measurement*. Journal of Composite Materials, 1992, Vol.26, Iss.5, 708.

Поступила в редакцию 14 октября 2024 года.

---

Сведения об авторах:

Пальчиков Денис Сергеевич – нач. испытательной лаборатории 025-02, «Испытательная лаборатория конструкционной прочности композиционных материалов и деталей авиационных двигателей и воздушного судна», Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, Россия; e-mail: [dspalchikov@ciam.ru](mailto:dspalchikov@ciam.ru)

Демчишин Александр Владимирович – асп., инж., Отдел 206 «Прочность композиционных материалов», Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, Россия; e-mail: [avdemchishin@ciam.ru](mailto:avdemchishin@ciam.ru)