

УДК 669.018.95:621.775.8

О.И. Гришина<sup>1</sup>, В.М. Серпова<sup>1</sup>

## ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-5-5

*Контроль упругопластического поведения металлических композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, является наиболее важной задачей, определяющей эксплуатационные качества как самого материала, так и элементов конструкций. Рассмотрены методы контроля, которые в совокупности дают полное представление о механизме разрушения, прочностных и упругих характеристиках металлического композиционного материала, армированного непрерывными однонаправленными волокнами. Показано, что на поведение материала при приложении нагрузки особое значение оказывают технологические дефекты, возникающие в процессе изготовления.*

**Ключевые слова:** *металлический композиционный материал, непрерывные волокна, механические свойства, методы контроля.*

*Control of elastic-plastic behavior of metal matrix composites reinforced with continuous fibers is the most important task of defining performance of both material and structural elements. The paper discusses methods of control, which together provide a complete understanding of fracture mechanism, strength and elastic characteristics of the metal matrix composites reinforced with continuous unidirectional fibers. It is shown that the behavior of material when applying the load specifically depends on technological defects arising during manufacture.*

**Keywords:** *metal matrix composites, continuous fibers, mechanical properties, control methods.*

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Возможность реализации проектов создания новой техники, в частности в авиакосмической отрасли, определяющей уровень научно-технического прогресса общества, в значительной мере обусловлена наличием новых материалов, отвечающих условиям их работы в конструкциях. Помимо снижения массы конструкции новые материалы часто должны работать в условиях более высоких температур, вибрационных нагрузок, обеспечивая при этом высокую стабильность свойств и надежность работы всей конструкции [1].

Разрабатываемые в настоящее время проекты новых изделий для авиационной техники не могут быть реализованы при использовании только традиционных материалов. В частности, создание и внедрение новых газотурбинных двигателей (ГТД) предусматривает разработку, создание и эксплуатацию двигателей с большой степенью двухконтурности, высоким уровнем тяги, весового и эксплуатационного совершенства, уменьшенной номенклатурой деталей при обеспечении высокого ресурса, надежности и экономичности [1–8].

Применение волокнистых металлических композиционных материалов (МКМ) при создании современных аппаратов и устройств требует учета их характерных особенностей, таких как: анизотропия жесткости и прочности, вязкоупругие свойства,

неоднородность упругих и прочностных параметров, опасность разрушения вдоль поверхностей раздела, определяющих несущую способность конструкции [9]. Решение этой проблемы невозможно без комплексных теоретико-экспериментальных исследований, направленных на выяснение физической картины процессов, протекающих в конструкции и в материале при предлагаемых эксплуатационных нагрузках.

Распределение напряжений в детали в процессе эксплуатации влияет на выбор видов и методик испытаний материала для решения вопроса – подходит ли данный материал для применения в конструкции.

При экспериментальном изучении и описании свойств композитов приходится сталкиваться с трудностями, порожденными макроскопической анизотропией и неоднородностью. Это делает проблему изучения механических характеристик композитов значительно более сложной, чем обычных однородных изотропных материалов. Возникающие трудности связаны с ростом (в зависимости от типа анизотропии) числа определяемых независимых характеристик и жесткими требованиями к выбору формы, размеров образцов и способа нагружения [9].

Одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик, решающей в вопросе о применении волокнистых МКМ в той или иной конструкции, является их сопротивление растягивающим нагрузкам, которое зависит в первую очередь от прочности и модуля упругости волокна и матрицы. В существенной мере прочностные характеристики также зависят от макро- (объемная доля, диаметр, тип укладки и дробленность волокон) и микроструктуры (плотность очагов схватывания на границе раздела «волокно–матрица», дефектность переходного слоя от волокна к матрице) [10].

В рамках реализации комплексного научного направления 12.1. «Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1] проведены теоретические исследования в области контроля прочностных характеристик волокнистых композиционных материалов при одноосном растяжении.

Разрушение композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, является многостадийным, многофакторным процессом, охватывающим различные масштабные и структурные уровни материала.

Для прогнозирования основных механизмов разрушения и прочности композиционных материалов необходимо учесть ряд параметров: свойства волокон и матрицы, межфазной границы, а также размер образца.

Для описания прочности при растяжении однонаправленного композиционного материала применяются различные модели, основанные на правиле смеси или аддитивности. Для оценки поведения при растяжении композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, исходя из аддитивности свойств отдельных компонентов, сделаны предположения о том, что все фазы при всех уровнях напряжений находятся в условиях равной деформации, волокна расположены параллельно оси нагружения, связь между волокном и матрицей является совершенной, свойства фаз остаются теми же, что и до объединения в композиционный материал, взаимодействие волокна с матрицей не приводит к появлению поперечных напряжений, при этом до нагружения в составляющих композиционного материала нет остаточных напряжений [11].

Образование хрупкого интерметаллида на межфазной границе может привести к ухудшению свойств композиционного материала. Термическое разупрочнение можно ограничить, изготавливая композиционный материал из взаимно нерастворимых составляющих или применяя покрытия на волокнах, которые служат барьерами для диффузии между матрицей и волокном. Например, нанесение электрофорезным осаждением порошка циркония на волокно карбида кремния позволяет предотвратить

взаимодействие волокна с титановой матрицей, тем самым существенно повысить прочность композиционного материала по сравнению с композиционным материалом, армированным тем же волокном без покрытия [12].

Одноосное растяжение является простейшим типом механических испытаний. Однако и для его реализации необходимо преодолеть ряд трудностей [13]. При исследовании механического поведения материала важен вопрос выбора ширины образца. Она должна быть достаточной для устранения «эффекта, перерезанных нитей». Далее у образцов из косо-, перекрестно- и ортогонально армированных материалов следует учесть взаимодействие слоев армирующих волокон и особенности напряженного состояния на свободных краях материала, т. е. кромочный эффект, который заключается в возникновении около свободных краев материала межслойных напряжений, направление действия и величина которых зависят от типа укладки волокон. Из-за отсутствия возможности теоретической оценки кромочного эффекта корректными можно считать только испытания образцов с однонаправленными волокнами, уложенными параллельно продольной оси образца [14, 15].

При выборе типа образца для экспериментального исследования свойств композиционного материала должно выполняться требование идентичности технологических условий изготовления образца и изделия. Так, если изделием является лист, например обшивка крыла самолета, то предпочтительными являются образцы, вырезанные из листа.

Конструкции плоских образцов, наиболее часто используемых для испытаний композиционных материалов вдоль и поперек волокон, схематически показаны рис. 1.

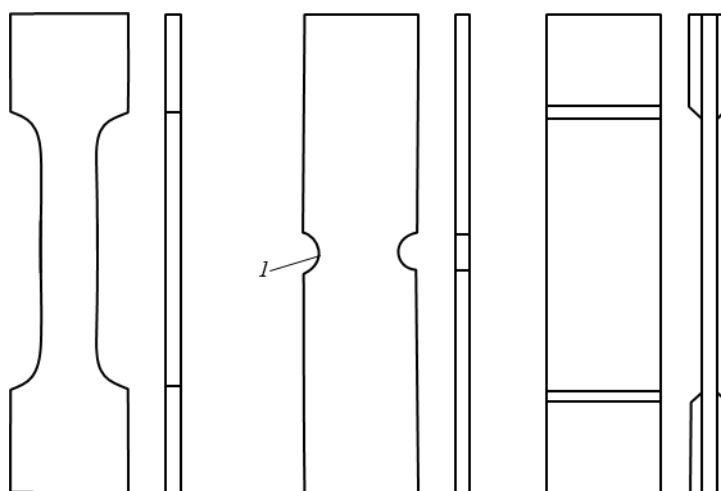


Рис. 1. Типы образцов для испытаний на статическое одноосное растяжение:  
*1* – утончение для повышения уровня напряжений

При выборе формы и способа изготовления образцов из МКМ должны быть правильно смоделированы все условия и процессы изготовления будущего материала, изделия или конструкции. Способы изготовления материала, соответствующие им образцы определенной формы и методы испытаний схематически показаны на рис. 2.

В зависимости от способа изготовления образцы для механических испытаний МКМ делятся на плоские (стержни, пластины) и тела вращения (кольца, трубы), а образцы в виде кольца (кольцевые) могут быть разрезаны на сегменты.

Образцы для механических испытаний волокнистых МКМ должны удовлетворять (кроме технологических) следующим требованиям: применимость для всех видов механических испытаний; простота и дешевизна приспособления для проведения

испытаний; простота установки в испытательной машине и проведения испытаний; воспроизводимость вида разрушения, его местоположения и численного значения прочности; применимость для определения упругих характеристик и исследования влияния окружающей среды; нечувствительность к способу крепления. Удовлетворить всем этим требованиям трудно, поэтому для определения прочности и упругих постоянных применяют образцы разной формы и размеров.

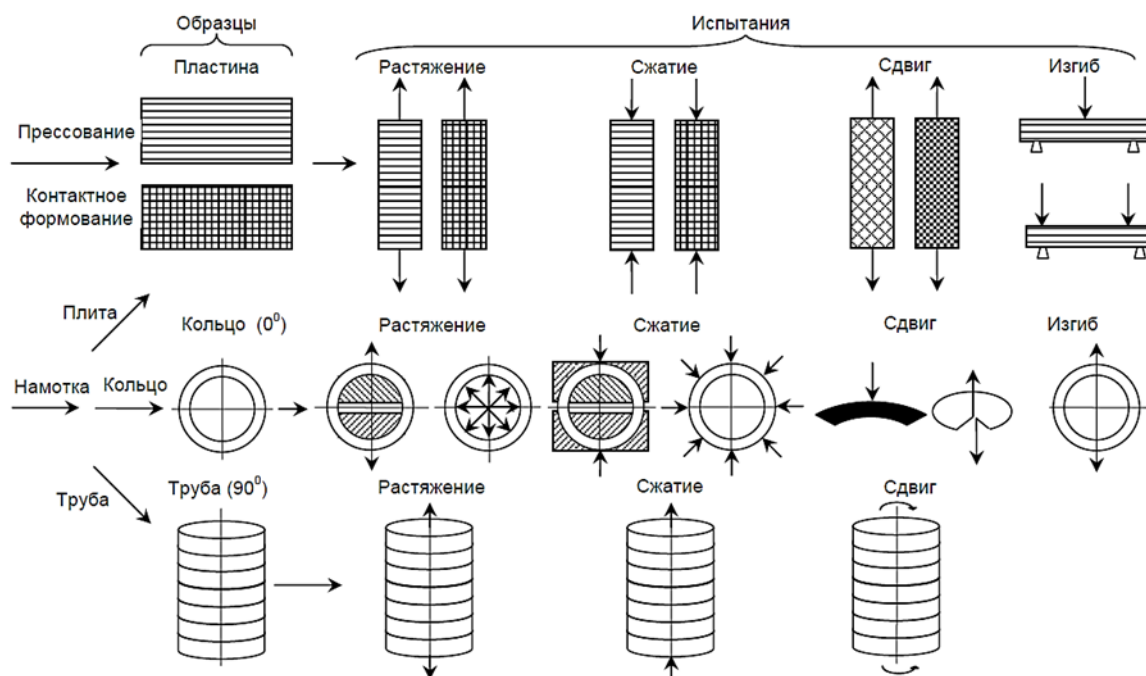


Рис. 2. Типы образцов и методы испытания

Форма образцов из волокнистых МКМ в значительной степени зависит также от цели испытаний: проверки научных гипотез, технической паспортизации материалов, контроля качества материалов.

Сопротивление межслойному сдвигу у большинства композиционных материалов намного меньше их прочности при растяжении, поэтому такие образцы обычно разрушаются при низких нагрузках от межслойного сдвига.

У прямоугольного образца с небольшими выточками напряженное состояние в центре несколько отличается от состояния однородного образца, что делает нецелесообразным размещение датчиков деформации в этой области. Кроме того, хотя выточки и сделаны именно с той целью, чтобы образец не разрушался в захватах, прочность при растяжении все же получается заниженной из-за концентрации напряжений вблизи самих выточек.

Крепление образца через многочисленные отверстия приближает деформированное состояние при растяжении к однородному. Однако для испытаний вплоть до предельных нагрузок этот способ не пригоден. Наиболее распространенным типом плоского образца, позволяющим избежать расслоения при одноосном растяжении, является образец в виде прямоугольной плоскости с концевыми накладками.

Особое внимание при растяжении однонаправленных композиционных материалов необходимо уделять контролю за совпадением направления действия нагрузки с направлением армирующих волокон. Очень часто относительно низкие измеряемые значения модуля упругости и прочности при растяжении в направлении волокон являются следствием несоосности в направлениях армирования и действующей силы.

Минимально необходимое оборудование для одноосных испытаний при растяжении включает датчик нагрузки (обычно используется силоизмеритель самой испытательной машины) и датчик продольных деформаций (экстензометр или тензодатчик сопротивления). На основании их показаний, снимаемых вплоть до разрушения, можно легко получить зависимости между напряжениями и деформациями в направлении нагружения, которое может быть различным по отношению к ориентации волокон.

При измерении коэффициента Пуассона в дополнении к упомянутому ранее оборудованию необходимы датчики деформаций, ориентированные под углом 90 град к направлению нагружения. Для удобства в этом случае обычно используют или два датчика деформаций (под углом 0 и 90 град к направлению нагружения), или датчик двухосных деформаций. Очень важно в этом случае при обработке результатов учитывать поперечную чувствительность тензодатчиков. Пренебрежение этим может привести к существенным ошибкам в определении коэффициента Пуассона [13].

Важным является и подход к технологии. Трещиноподобные дефекты, которые могут возникать на стадии изготовления материала или в процессе эксплуатации изделия, оказывают влияние на прочность, механизмы разрушения и эксплуатационные качества элементов конструкций. Особого внимания требуют технологические дефекты – в частности пористость, искривления и разориентация волокон. Пористость проявляется при оценке свойств, определяемых матрицей (например, прочности при сдвиге). Влияние искривления волокон проявляется при определении характеристики в направлении армирования.

Таким образом, контроль упругопластического поведения МКМ, армированных непрерывными волокнами является наиболее важной задачей, определяющей эксплуатационные качества как самого материала, так и элементов конструкций. Для оценки прочности и жесткости необходимо применять прямые и косвенные методы, которые в совокупности дают полное представление о механизме разрушения, прочностных и упругих характеристиках. Поскольку наибольшее предпочтение отдано прямым методам контроля, то необходимо учитывать направление приложения нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // *Крылья Родины*. 2010. №4. С. 31–33.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2011. №SP2. С. 13–19.
5. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2016).
6. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
7. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 5–6.
8. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 6–8.

- 
9. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М.: Наука–Физматлит, 1997. 288 с.
  10. Кристенсен Л.М. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
  11. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы. М.: Мир, 1978. Т. 1: Поверхности раздела в металлических композитах. 438 с.
  12. Zirconium Diffusion Barrier in Titanium-Silicon Carbide Composite Materials: pat. 3717443 US; publ. 20.02.73.
  13. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы. М.: Машиностроение, 1978. Т. 8: Анализ и проектирование конструкций. Ч. 2. 264 с.
  14. Тамуж В.П., Тетере Г.А. Проблемы механики композитных материалов // Механика композитных материалов. 1979. №1. С. 34–45.
  15. Шатерина М.А. Технология конструкционных материалов. М.: Политехника, 2005. 597 с.