# № 3 2009

# НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А.Р. Банселл<sup>1</sup>, А. Тионнэ<sup>1,3</sup>, С. Камара<sup>2</sup>, Д.Х. Аллен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Высшая Парижская политехническая школа, Франция, <sup>2</sup>Университет штата Небраска, Инженерный колледж, США, <sup>3</sup>Университет Бургундии, Миранда, Франция

Сосуды давления используются с самого начала промышленной революции, накоплен огромный опыт их использования, часто – ценою человеческих жизней при взрывах. Традиционно сосуды давления изготавливаются из стали, и тот эмпирический опыт, который был накоплен в результате аварий, в настоящее время может быть понятным в терминах механики разрушения. Однако стальные сосуды тяжелы и не очень пригодны для хранения газов, используемых в качестве топлива транспортных средств. Но в настоящее время отсутствует методика оценки надёжности композитных сосудов давления, которая могла бы быть основой для оценки времени жизни такого изделия. Стандарты, основанные на понимании механизмов разрушения металлических сплавов, не подходят для данного случая, поскольку процессы разрушения композитов существенно отличаются от таковых в металлических сплавах. В настоящей статье исследуется эволюция структуры композитных сосудов под давлением в течение времени и предложены методы определения остаточной долговечности.

*Ключевые слова:* композиты, углепластики, сосуды давления, прочность, долговечность, моделирование.

# DAMAGE ACCUMULATION AND LIFE PREDICTION IN CARBON FIBRE COMPOSITE PRESSURE VESSELS

# A.R. Bunsell<sup>1</sup>, A. Thionnet<sup>1, 3</sup>, S. Camara<sup>2</sup> and D.H. Allen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mines ParisTech, Centre des Matériaux, France, <sup>2</sup>University of Nebraska, College of Engineering, USA, <sup>3</sup>Université de Bourgogne, Mirande, France

Pressure vessels have been in use since the beginning of the industrial revolution and a large body of empirical knowledge has been accumulated over the years, often at the expense of human lives lost in explosions. Traditionally these pressure vessels have been made of steel and the experience which has been obtained through accidents is now largely understood in terms of metallurgical mechanisms determining crack propagation. However steel is heavy and such pressure vessels are unsuitable for the storage of gases used as a fuel for vehicles. At present, there are no proof testing techniques or in-service reliability assessments techniques which are mentioned in standards that are suitable or based on the failure processes known to control lifetimes of composite structures. The standards which are described are based on the behaviour of metals which fail by processes which do not occur in composites. This paper will demonstrate how such composites evolve with pressure and time and propose means to determine residual lifetimes of composite pressure vessels.

Keywords: composites, CFRPs, pressure vessels, abstract, illustrations, strength, lifetime, modeling.

#### Введение

Сосуды давления используются с самого начала промышленной революции, накоплен огромный опыт их использования, часто – ценою человеческих жизней при взрывах. Традиционно сосуды давления изготавливаются из стали, и тот эмпирический опыт, который был накоплен в результате аварий, в настоящее время может быть понятным в терминах механики разрушения.

Стандартная процедура оценки надёжности металлического сосуда давления – это гидравлическое испытание, при котором сосуд нагружается полуторакратным давлением по отношению к максимальному, которое может быть достигнуто в процессе эксплуатации. Если сосуд выдерживает это давление, то он считается пригодным для использования в эксплуатации. Интуитивно эта процедура удовлетворительна и может быть обоснована, так как при повышенном давлении любая зародившаяся трещина либо будет распространяться, вследствие повышенного напряжения в окрестности трещины, или же в этой окрестности возникает пластическая зона, которая при меньших давлениях не позволяет трещине продвигаться далее. Однако стальные сосуды тяжелы и не очень пригодны для хранения газов, используемых в качестве топлива транспортных средств. Ограниченная доступность нефти ведёт к всё увеличивающемуся использованию природного газа в качестве горючего, и это может рассматриваться в качестве предтечи для использования в этом качестве водорода. Трудность здесь состоит в том, что газы должны быть сжаты высоким давлением, и хотя водород в 3 раза более калорийный, чем бензин, он намного легче и должен быть сжат до давления 70 МПа (700 атм.), для того чтобы быть эффективным в качестве горючего в будущем.

Современные композиты, состоящие обычно из высокопрочных волокон в эпоксидной матрице, используются для сосудов давления, и это представляет собой очевидное решение, удовлетворяющее потребности транспорта. Они всё больше используются в качестве баков горючего для автобусов, специального транспорта и легковых машин [1]. Композиты идеально подходят для такого рода приложений: они характеризуются малой плотностью, высокой прочностью и жёсткостью. Но в настоящее время отсутствует методика оценки надёжности композитных сосудов давления, которая могла бы быть основой для оценки времени жизни такого изделия. Стандарты, основанные на понимании механизмов разрушения металлических сплавов, не подходят для данного случая, поскольку процессы разрушения композитов существенно отличаются от таковых в металлических сплавах. Композитные материалы разрушаются не простым распространением трещины, и в этих материалах пластическая деформация не является доминирующим механизмом в трещиностойкости. Гидравлическое испытание композитного сосуда давления будет иметь лишь одно очевидное последствие, которое состоит в том, что волокна, которые не разрушились в процессе эксплуатации, разрушатся в процессе испытаний. Визуальная инспекция сосуда также не может быть принята в качестве альтернативы, поскольку такие внешние воздействия, как удар, влекут за собой расслоения на тыльной стороне стенки сосуда, и они не могут быть обнаружены при такой проверке.

Известны методы, например ультразвуковой контроль, которые позволяют идентифицировать повреждения, возникшие в результате удара, однако каждый сосуд давления будет использоваться в течение десятилетий, 20–30 лет, и предположить, что углепластики на основе эпоксидов не будут подвергаться старению в результате комбинированных воздействий давления и времени, было бы, очевидно, неверным.

В настоящей статье исследуется эволюция структуры композитных сосудов под давлением в течение времени и предложены методы определения остаточной долговечности.

Композитные сосуды изготавливаются путем намотки волокон по геодезическим линиям на оправку, которая в дальнейшем служит лайнером, обеспечивающим газонепроницаемость. Это означает, что когда сосуд нагружается внутренним давлением, волокна подвергаются только растягивающим нагрузкам, и в принципе композит ведет себя так же, как однонаправленный композит, нагружаемый в направлении волокон. Как и в случае однонаправленно-армированного композита, разрушение волокон означает разрушение материала. Кроме того, предельное давление, по достижении которого сосуд взрывается, определяется слоем волокон, намотанным на цилиндрическую часть сосуда давления в направлении 90° к его оси. В случае углепластика на волокна приходится около 99% общей нагрузки. Следовательно, разрушение углеволокон есть именно тот механизм, который определяет разрушение композитного сосуда давления. Это не распространение трещины, как в случае сосуда, изготовленного из металлического сплава, и как это подразуме-

вается при формулировании стандартов на металлические сосуды.

Последствия разрушения волокон в композитном материале исследовались в большом числе публикаций, начиная с работы Кокса [2], который разработал двухмерную аналитическую модель передачи нагрузки от упругой матрицы к упругому волокну в этой матрице. Это исследование продемонстрировало, что фундаментальным механизмом, контролирующим поведение композита, является передача нагрузки подвергнутой сдвигу матрицей на волокно, прочно с нею связанное. Растягивающее усилие в волокне возрастает, начиная от его конца. Записав уравнение равновесия для этой ситуации, Кокс получил аналитическое решение для напряжённого состояния в волокне и его окрестности в композите с короткими волокнами. Последующие работы были посвящены композитам с идеально пластичной матрицей, в этом случае анализ упрощался [3]. В ряде работ был рассмотрен эффект перегрузки в окрестности разрушенного волокна [4, 5]. Было показано, что эффект перегрузки оказывается локальным, и лишь ближайшие соседи к оборванному волокну испытывают в связи с этим перегрузки. С появлением компьютеров и ростом вычислительных возможностей эта ситуация стала предметом многочисленных исследований на двух- и трёхмерных моделях, в частности, в некоторых из этих работ рассматривались эффекты, связанные с вязкоупругостью матрицы [6–8].

Исследование в нашей группе вернулось к этой проблеме в целях совершенствования моделей и приложения результата к различным намотанным конструкциям, включая сосуды давления. Для того чтобы сразу же использовать полученные методы, была взята абсолютно практическая задача. В однонаправленном образце углепластика с поперечным сечением  $20 \times 1$  мм присутствует около 136 000 волокон. В любом поперечном сечении сосуда давления – бака для разнообразного топлива – около 1,25 млн волокон. Очевидно, что любая попытка моделировать поведение столь громоздкой структуры дискретизацией на уровне отдельных волокон привела бы к недопустимо большим вычислительным временам. Но механизмы, которые определяют разрушения, работают на уровне отдельных волокон. Поэтому был принят FE<sup>2</sup> полимасштабный подход, в основном совпадающий с техникой, описанной в работах [9, 10].

#### 1. Описание процесса разрушения на микроуровне

В настоящей работе волокно и матрица рассматриваются как однородные сплошные среды. Орторомбическая пространственная решётка на микроуровне есть  $R_{loc} = (O, x, y, z)$ , где (x, y, z) суть координаты точки M. Вектор z параллелен направлению волокон. В предыдущих работах [11–14] вводится представительный объёмный элемент (ПОЭ) для неповреждённого композита.

Если композит считать периодической средой с гексагональной укладкой волокон относительно плоскости (*x*, *y*), то ПОЭ, включающий 32 волокна, обозначим CS32. Он представляет собой



параллелепипед с осью *z* в направлении волокон и поперечным сечением в виде квадрата со стороной *c* (рис. 1). Как и в работе [14], высота элемента между плоскостями z = 0 и z = L принимается равной 8 мм. Точка *O* есть геометрический центр элемента в плоскости z = 0. В этой точке напряжённо-деформированное состояние даётся тензорами  $\sigma$  и  $\varepsilon$ .

Предыдущие исследования показали, что этот подход строго описывает ситуации, возникшие в окрестности отрыва волокна, при этом принимаются во внимание и анализируются:

• статистическая природа обрывов волокна, случайное расположение точек вдоль волокна;

• до пяти уровней повреждений в ПОЭ, следующих за неповреждённым состоянием и обозначаемых как C32,C16, C8, C4, C2 (см. рис. 1), они содержат соответственно 1, 2, 4, 8 и 16 оборванных волокон из 32 в ПОЭ;

• передача нагрузки от обрывов к неповреждённым волокнам;

• влияние расслоений на границе в окрестности обрыва волокна на передачу нагрузки на волокна; рассматриваются 10 длин расслоений: от 3,5 до 35 мкм с интервалом 3,5 мкм;

• влияние линейной вязкоупругости матрицы на передачу нагрузки от разрушенного волокна на целые.

Коэффициент передачи нагрузки

$$K_{\gamma} = \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} \int_{S_F}^{z_{i+1}} \sigma_{zz}(C, d, t, V_f, x, y, z) dx dy dz}{\int_{z_i}^{z_{i+1}} \int_{S_F}^{z_{i+1}} \sigma_{zz}(CS32, d = 0, t = 0, V_f, x, y, z) dx dy dz},$$

где C – одно из повреждённых состояний элемента; d – длина расслоения; t – время после обрыва волокна;  $V_f$  – объёмное содержание волокна; z – текущая координата от точки обрыва (z = 0),  $z_{i+1}$  и  $z_i$  суть координаты плоских сечений элемента, между которыми вычисляется  $k_r$ ;  $S_F$  – поперечное сечение волокна; x, y – координаты в поперечном сечении;  $y_{zz}$  – нормальное напряжение в рассматриваемом волокне.

Приведённое определение для  $k_r$  остаётся справедливым для случаев расслоения на границе, или его отсутствия, упругой и вязкоупругой матрицы.



Simulated fibre failures in unidirectional composites loaded to 80% of failure load showing scatter due to the stochastic nature of fibre strengths and also variations in Weibull moduli between the A and B curves

## 2. Конструирование упрощённой базы данных на микроуровне

Рассмотрим одну ячейку и примем длину расслоения равной 140 мкм: при такой длине эффектом расслоения можно пренебречь. В этом случае расчётная схема включает 250 000 узлов, и компьютерное время составляет около 2 ч для чисто упругой модели. Если такой подход применить к макроструктуре, для которой число Гауссовых точек порядка тысяч, время вычисления окажется недопустимо большим. Следовательно, необходим менее времяёмкий подход. Для упрощения вычислительных процедур функция передачи нагрузки была сглажена и линеаризирована, учитывалась перегрузка только в волокнах – ближайших соседях разрушенного. Для того чтобы разделить эффекты, связанные с чисто упругим поведением системы, расслоением и вязкоупругостью матрицы, принимаем следующее представление:

$$k_{\gamma} = K_{\gamma} + K_{\gamma}^{d} + K_{\gamma}^{\nu},$$

где  $K_{\gamma}$  определяется чисто упругим поведением;  $K_{\gamma}^{d}$  даёт вклад расслоения,  $K_{\gamma}^{d} = 0$ , при этом в отсутствие такового  $K_{\gamma}^{v}$  даёт вклад вязкоупругости матрицы, при этом  $K_{\gamma}^{v} = 0$ , если вязкоупругость не учитывается.

Эти сглаженные параметры используются в качестве базы данных, описывающей ситуацию на микроскопическом уровне, которая должна быть учтена в полимасштабной FE<sup>2</sup> модели. Знание усреднённого напряжения, приложенного на макроскопическом уровне, продолжительности нагрузки и степени повреждения позволяет, в силу линейности задачи, определить напряжённое состояние компонентов на микроскопическом уровне. Растягивающее напряжение в волокне может быть вычислено без решения задачи на микроскопическом уровне, используя метод конечного элемента и учитывая эволюцию повреждения, состоящую в увеличивающемся числе разрушенных волокон в ПОЭ. Предполагается при этом, что разрушение волокна приводит к расслоению на длине 35 мкм, что даёт, как было показано, наибольшую концентрацию напряжения в неразрушенных волокнах.

Для того чтобы оценить относительный вклад различных физических явлений для различных величин объёмного содержания волокна, необходимо рассмотреть шесть уровней уточнения моделей: на первом уровне принимаются во внимание только обрывы волокон; на вгором уровне добавляется эффект перегрузки соседних волокон, окружающих разорванное волокно; на третьем уровне включается эффект отслоения матрицы от волокна в окрестности точки разрыва и затем указанные три степени усложнения модели рассматриваются вновь с учётом вязкоупругости матрицы.

# 3. Описание макроскопического уровня, обоснование использования параллельных вычислений

Углеволокна, используемые в рассматриваемых образцах и сосудах давления, имеют радиус 3,5 мкм, так что размеры трёх CS32 ячеек, представляющих три объёмных содержания волокна – 19, 39 и 64%, были соответственно 0,080×0,080×8 мм, 0,056×0,056×8 мм и 0,044×0,044×8 мм. Их объёмы равны:  $V_{19\%} = 0,0512$  мм<sup>3</sup>,  $V_{39\%} = 0,0251$  мм<sup>3</sup>,  $V_{64\%} = 0,0155$  мм<sup>3</sup>.

Расчеты, выполненные для плоских лабораторных образцов, показали, что соответствующая сетка, необходимая для должной сходимости вычислительной процедуры, может быть построена на базе конечного элемента типа с3d8, которая содержит 4 ПОЭ.

Если цилиндрическая часть сосуда давления имеет длину 500 мм, внутренний радиус 100 мм и толщину композитной стенки 10 мм, то сетка конечных элементов для объёмного содержания волокна 39% будет состоять приблизительно из 40 x 10<sup>6</sup> элементов, каждый их которых содержит 4 ПОЭ и соответствующее количество узлов. Это приводит приблизительно к 300 x 10<sup>6</sup> Гауссовым точкам и 120 x 10<sup>6</sup> степеням свободы. В чистом виде расчёты по схеме FE<sup>2</sup> потребовали бы 300 x 10<sup>6</sup> x 2 = 600 x 10<sup>6</sup> ч вычислительного времени. Таким образом, использование параллельных вычислений, очевидно, является необходимым.

Чтобы сократить время вычислений на макроскопическом уровне, моделирования долговременного макроскопического поведения однонаправленного композита, принятые гипотезы основывались на экспериментальных наблюдениях, и они не сказываются на качестве окончательного результата.

На макроскопическом уровне композит можно рассматривать как некоторый эквивалентный однородный материал в орторомбических координатах:  $b_{loc}(x_1, x_2, x_3)$ . Здесь  $x_1$  совпадает с направлением волокон, и на этом уровне в точке M тензор напряжения есть  $\Sigma$  и тензор деформации есть E.

Первая гипотеза состоит в том, что единственным механизмом, определяющим разрушение композита, является разрушение волокон. Это означает, что такие нелинейные эффекты, которые возникают при нагружении композита в направлении, отличном от направления волокон, как межслоевое растрескивание и вязкоупругое поведение, не рассматриваются. Вторая гипотеза состоит в том, что, в отличие от рассмотрения на микроскопическом уровне, вязкоупругостью матрицы на макроскопическом уровне можно пренебречь. Это означает, таким образом, что нелинейное поведение однородного эквивалентного материала считается только результатом разрушений волокна и отражает плотность разрушенных волокон.

Эффективный модуль упругости эквивалентного однородного материала, как функция плотности обрывов волокон, может быть найден как решение задачи периодической гомогенизации. Уже первое приближение, основанное на правиле смесей, дающем верхнюю оценку, приводит к приемлемому результату. В конечном счёте получим, что в координатах  $b_{loc}$  поведение однонаправленного композита даётся  $\sum (M) = a(M)$ : E(M) с  $a(M) = a^0(M)$ , где  $a^0(M)$  есть тензор жёсткостей в неповреждённом материале в точке M, за исключением

$$a_{1111}(M) = a_{1111}^0 \left\{ 1 - \frac{N_R(M)}{N_T} \right\},\,$$

где  $N_R$  и  $N_T$  суть число разрушенных волокон и общее число волокон в ПОЭ соответственно ( $N_T = 32$  в данном случае).

Вторая гипотеза приводит к тому, что единственным важным фактором, определяющим поведение композита, является обрыв волокна и передача нагрузки с этого волокна на неповреждённые волокна. Из второй гипотезы следует также, что необходимо рассматривать только нагружение композита в направлении волокна и не рассматривать нагружение в иных направлениях.

#### 4. Многоуровневые вычисления

Исходными данными для этих вычислений являются следующие.

*На макроскопическом уровне*: характеристики неповреждённого композита и правило (закон), описывающее уменьшение продольной жёсткости эквивалентного однородного материала.

На микроскопическом уровне для каждой Гауссовой точки: случайный выбор пяти разрушающих напряжений, соответствующих Вейбулловой статистике, которая хорошо описывает экспериментальные данные по прочности волокон; база данных, позволяющая оценить осевые напряжения в волокнах ПОЭ и эволюцию повреждения от исходного неповреждённого состояния в CS32 до полного разрушения, представленного в C2.

Упрощённые вычисления по схеме  $FE^2$  являются итерационными и дают в результате состояние повреждения (число разрушенных волокон) на шаге итераций *n*, определяя состояние повреждения на шаге n - 1 следующим образом.

Приращение времени даётся либо совместно, либо без изменения макроскопического напряжения, в зависимости от того, имеет ли место приращение нагрузки, или же испытание проводится при постоянной нагрузке.

Расчёты методом конечного элемента на макроскопическом уровне определяют макроскопическое напряжение на композите в направлении волокна.

су Следующая итерация в Гауссовых точках на микроскопическом уровне.

↓ Далее локализация – получив макроскопическое напряжение и состояние повреждения материала, применяем базу данных, содержащую информацию о перегрузках напряжения в окрестностях обрыва с тем, чтобы вычислить осевое напряжение в волокне, содержащемся в ПОЭ. Это напряжение позволяет определить число разрушенных волокон в ПОЭ путём сравнения напряжения с разрушающим напряжением, полученным на основе Вейбулловой статистики.

Шаг гомогенизации – расчёт макроскопического поведения однородного эквивалентного материала с учётом нового состояния повреждения.

Следующий шаг итеративного процесса на приращении времени.



#### 5. Приложение модели к однонаправленному плоскому образцу

unidirectional specimens loaded in the fibre direction

Описанный выше подход как моделирование накопления повреждений был использован для вычисления разрушающего напряжения однонаправленного плоского образца, нагружаемого в направлении волокон. Оказалось, что эта модель даёт достаточно точную оценку разрушающего напряжения (точность составляет ±2%), и при усложнении модели путём включения в неё расслоений на границе раздела волокна и матрицы оказывается возможным оценка разброса прочности композита [13]. В этой же работе исследуются эффекты, связанные с вязкоупругими свойствами матрицы при долговременном нагружении композита постоянной нагрузкой. Показано, что модель оказывается в состоянии предсказать скорость накопления обрывов волокна в композите, которая сравнивается с экспериментальными данными по акустической эмиссии. В настоящем исследовании было принято во внимание изменение Вейбуллова модуля, которое имеет место при выборе 32 волокон из очень большой их популяции. Показано, что даже если большая популяция имеет определённую величину Вейбуллова модуля, произвольный выбор 32 волокон приводит к очень большому разбросу получаемого результата [15]. Эти результаты показывают (рис. 2), что повреждение увеличивается со временем, и разброс уровня повреждений, когда различные образцы подвергаются одной и той же нагрузке, увеличивается в результате того, что рассматривается только ограниченное число волокон в ПОЭ.

Если сравнить эти результаты с полученными экспериментальными кривыми (рис. 3), то будет очевидным их хорошее соответствие эксперименту.

#### 6. Приложение модели к сосуду давления

Распространим теперь изложенный выше метод на сосуд давления, структура которого моделируется конечными элементами, как показано на рис. 4.



Результаты вычислительного эксперимента для случая монотонного нагружения сосудов давления с различным объёмным содержанием волокна показаны на рис. 5. Хотя малые объёмные доли волокна вряд ли можно найти в реальных конструкциях, они могут иметь место в некоторых объёмах конструкции в результате неоднородного распределения волокон. Точки, в которых кривые начинают существенно отклоняться от прямой линии, - это ситуации, когда обрывы волокон начинают взаимодействовать и приводят к механической неустойчивости сосуда. На рис. 6 показаны результаты вычислительного эксперимента, дающего накопление обрывов волокна в сосуде давления, рассчитанном на предельное давление примерно 80 МПа, при давлении 50 МПа. Точки представляют собой

расчётные величины, непрерывная линия – аппроксимацию. Эти результаты соответствуют экспериментальным кривым, полученным в испытаниях сосудов давления и опубликованным в работе [12].

Данные на рис. 6 показывают, что повреждения накапливаются в композитном сосуде давления со временем. Однако в данном случае это повреждение состоит из изолированных областей, и это определяется эффектом перегрузки волокон через матрицу. Механическая нестабильность возникает,



Simulated burst tests for three pressure vessels with various fibre volume fractions



когда плотность обрывов достигает некоторой критической величины и повреждённые области начинают взаимодействовать между собой. Эта ситуация демонстрируется на рис. 7. Точка нестабильности определяется как точка перегиба на кривой накопления повреждений для сосуда давления, подвергнутого давлению 70 МПа (700 атм.). Хотя эта точка и не соответствует взрывному разрушению сосуда давления, она представляет собой предел его надёжного использования.

Точка перегиба, дающая предел надёжности сосуда давления, отодвигается на большие времена при уменьшении давления, и на рис. 7 она не показана для меньших давлений.

## 7. Контрольные испытания композитного сосуда давления

Проведенный выше анализ вместе с экспериментальными результатами может быть использован для оценки повреждения сосуда давления, даже если его состояние не было подвергнуто предварительному мониторингу, при условии, что его история нагружения известна. Если сосуд нагружался постоянным давлением в течение некоторого времени, то кривые накопления повреждений и акустической эмиссии в зависимости от времени оказываются подобными. Неважно, как именно статистические обрывы волокон накапливались в процессе эксплуатации, поскольку только плотность обрывов определяет акустическую эмиссию в случае, когда сосуд давления нагружается постоянным давлением. Следовательно, может быть построена эталонная кривая, основанная на рассмотренной выше модели, для идеального сосуда давления, который накапливает повреждения рассмотренного типа и достигает точки перегиба, т.е. состояния неустойчивости, точно в конце заданного периода эксплуатации, например, 20 лет. Любой сосуд давления, подвергнутый подобной истории нагружения, будет следовать указанной кривой, и остаётся лишь ответить на вопрос: достигнет ли он точки нестабильности до того, как она появляется на эталонной кривой, или для этого необходимо большее время. Контрольное испытание состоит в нагружении сосуда



the maintenance of the pressure constant. The curve for a pressure of 50 MPa – 500 bars shown in the previous figure is reduced because of the reduction in scale. The point of inflection seen on the curve for 70 MPa (700 bars) reveals the point at which regions of damage begin to interact and the pressure vessel is no longer reliable

постоянным давлением, равным максимальному при его эксплуатации, и записи акустической эмиссии в течение некоторого определённого периода времени, например 24 ч. Если точка перегиба для данного сосуда давления находится за пределами требуемого времени эксплуатации, то кривая акустической эмиссии будет лежать ниже эталонной кривой. В этом случае результатом контрольного испытания является решение о продолжении эксплуатации сосуда давления. В противном случае сосуд должен быть снят с эксплуатации. Схематически это сравнение эталонной кривой и кривых контрольного испытания показано на рис. 8 [16]. Такого типа испытания на самом деле не требуют знания рассмотренной выше модели, которая нужна, по сути, лишь для построения эталонной кривой для заданной партии сосудов давления. Модель может быть также развита для оценки критического уровня повреждения, соответствующего точке перегиба. Испытания попросту представляют собой мониторинг повреждения путём использования техники акустической эмиссии для заданного времени и сравнения полученных результатов с эталонной кривой. Для упрощения процедуры она может быть автоматизирована.

## Выводы

Построена достаточно строгая модель, дающая накопления обрывов волокон в однонаправленном композите, нагруженном в направлении волокон. В вычислительном эксперименте, основанном на этой модели, использована упрощённая многоуровневая конечно-элементная схема, в



которой учитываются статистические характеристики прочности волокна, изменения Вейбуллова модуля из-за рассмотрения конечного числа нагружаемых волокон, передача напряжения от разрушенного волокна через матрицу, вязкоупругое поведение матрицы, а также расслоение на границе раздела волокна и матрицы. Показано, что такая модель хорошо описывает экспериментальные результаты, полученные при монотонном нагружении образца растяжением и при длительном нагружении его постоянным напряжением. Модель также позволяет оценить разброс, ожидаемый в эксперименте.

Использование схемы параллельных вычислений позволило построить многоуровневую модель, которая описывает поведение всей конструкции сосуда давления. Аналогия между поведением однонаправленных композитов и сосудов давления, выполненных из такого же типа композитного материала, обосновывается сравнением экспериментальных и расчётных результатов. Показано, что как только плотность повреждений оказывается настолько большой, что начинается их взаимодействие, скорость накопления повреждений увеличивается. Этот переход от затухающей скорости накопления повреждений к ускоряющейся скорости даёт точку механической неустойчивости конструкции и, следовательно, предел безопасного использования сосуда давления.

Предложенная схема контрольного испытания основана на понимании реальных механизмов разрушения, определяющих устойчивое состояние сосуда давления, но не на интуиции и моделях, основанных на поведении металлических сплавов. Эта схема проста в использовании и не требует дорогого оборудования, поэтому её следует внедрять с большей скоростью, чем это происходит в настоящее время, что позволит оптимизировать конструкцию композитных сосудов давления и оценить надёжным образом их остаточную долговечность в процессе эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Келли А. Инженерный триумф углеволокон // Композиты и наноструктуры. 2009. № 1. С. 38–49.

2. Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials // British journal of applied physics. 12 (1951). P. 72–79.

3. Kelly A. Strong Solids // Clarendon Press. Oxford, 1963.

4. Rosen B.W. Tensile failure of fibrous composites // AIAA Journal. 2 (1964). P. 1985–1991.

5. Zweben C. Tensile failure of fiber composites // AIAA Journal. 6 (1968). P. 2325–2331.

6. Nedele M.R., Wisnom M.R. Three dimensional finite analysis of the stress concentration at a single fibre break // Composites science and technology. 41 (1991). P. 237–256.

7. Landis C.M., Beyerlein I.J., McMeeking R.M. Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites // J. mechanics and physics of solids. 48 (2000). P. 621–648.

8. Lifschitz J.M., Rotem A. Time-dependent longitudinal strength of unidirectional fibrous composites // Fibre science and technology. 3 (1970). P. 1–20.

9. Feyel F. A multilevel finite element method ( $FE^2$ ) to describe the response of highly non-linear structures using generalized continua // Computer methods in applied mechanics and engineering. 193 (2003). P. 3233–3244.

10. Souza F.V., Allen D.H., Kim Y.R. Multiscale model for predicting damage evolution in composites due to impact loading // Composites science and technology. 68 (2008). P. 2624–2634.

11. Blassiau S., Thionnet A., Bunsell A.R. Micromechanisms of load transfer in a unidirectional carbonepoxy composite due to fibre failures. Part 1 : Micro-mechanisms and 3D analysis of load transfer, the elastic case // Composite structures. 74 (2006). P. 303–318.

12. Blassiau S., Thionnet A., Bunsell A.R. Micromechanisms of load transfer in a unidirectional carbonepoxy composite due to fibre failures. Part 2: Influence of viscoelastic and plastic matrices on the mechanism of load transfer // Composite structures. 74 (2006). P. 319–331.

13. Blassiau S., Thionnet A., Bunsell A.R. Micromechanisms of load transfer in a unidirectional carbonepoxy composite due to fibre failures. Part 3 : Multiscale reconstruction of composite behaviour // Composite structures. 83 (2008). P. 312–323.

14. Baxevanakis C. Comportement statistique a rupture des composites stratifiйs / Doctorate thesis Ecole des Mines de Paris (1994).

15. Berger M.-H., Jeulin D. Statistical analysis of the failure stresses of ceramic fibres: Dependence of the Weibull parameters on the gauge length, diameter variation and fluctuation of defect density // J. Mat. Sci. 38 (2003). P. 2913–2923.

16. Bunsell A.R. Composite pressure vessels supply an answer to transport problems // Reinforced Plastics. 2 (2006). P. 38–41.

# Сведения об авторах

**1. Anthony Bunsell:** professor, Centre des Matériaux Mines Paris, Paristech, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France, e-mail : alain.thionnet@ensmp.fr, anthony.bunsell@ensmp.fr

**2. Alain Thionnet:** professor, Centre des Matériaux Mines Paris, Paristech, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France; Université de Bourgogne, Mirande, BP 47870, 21078 Dijon, France.

**3. Savio Camara:** student, University of Nebraska, College of Engineering, 114 Othmer Hall, Lincoln, NE 68588-0642, USA, e-mail : scamara@bigred.unl.edu, dhallen@unl.edu

**4. David Allen:** professor, University of Nebraska, College of Engineering, 114 Othmer Hall, Lincoln, NE 68588-0642, USA, e-mail : scamara@bigred.unl.edu, dhallen@unl.edu