

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТМАСС ПРИ ИЗГИБЕ

Струкова Анна Викторовна

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Разработка систем безопасности транспортных средств не возможна без моделирования поведения деталей и конструкций в аварийных ситуациях. Для описания механических свойств используемых материалов применяется диаграмма разрушения, которая строится в координатах предельная деформация разрушения – параметр вида деформированного состояния (для материала, разрушающегося отрывом) или параметра вида напряженного состояния (для материал разрушающегося срезом).

Экспериментальная диаграмма разрушения отрывом строится по результатам следующих испытаний:

- одноосное растяжение,
- растяжение плоских образцов с поперечной канавкой,
- растяжение приталенных образцов в условиях, близких плоской деформации,
- трехточечный изгиб полосы;
- равномерное двухосное растяжение и другие.

Методика предсказания разрушения конструкций по диаграммам разрушения материалов основа на предположении, что предельная деформация материала в условиях одного и того же вида деформированного состояния не зависит от механизма создания этого деформированного состояния. Таким образом, предельные деформации разрушения при растяжении приталенных образцов и изгибе широкой полосы должны иметь близкие значения, так как в обоих случаях разрушение наступает в условиях плоской деформации.

Методика проведения эксперимента трехточечный изгиб полосы состоит в следующем. Вырезают две партии прямоугольных заготовок 12х50 мм, ориентированных одинаково к направлению прокатки (вдоль прокатки и поперек прокатки). Изгиб заготовок выполняют в специальном устройстве (рис.1), установленном на прессе. Устройство состоит из неподвижного основания 5, подвижной траверсы 6, которая перемещается по направляющим стойкам 4 при приложении нагрузки. Заготовка 1 изгибается через щель в жесткой съемной полуматрице 3 пуансоном 2 с цилиндрическим наконечником радиуса R перпендикулярно длинной стороне заготовки.

Испытания проводят набором съемных пуансонов с радиусами 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 мм с соответствующими съемными полуматрицами. Ширина щели выбирается в зависимости от толщины испытываемого листа так, чтобы при испытании обеспечивался чистый прямой изгиб.

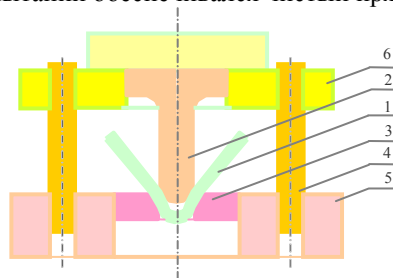


Рисунок 1 – Схема установки для трехточечного изгиба

Уменьшая радиусгиба образца от испытания к испытанию, определяют наименьший радиус пуансона, после изгиба которым образец разрушается  $r_{\min}$ . Радиус пуансона в испытании, предшествующем разрушению или растрескиванию образца, считают минимальным радиусомгиба. Предельная деформация разрушения вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{fr}^* = \frac{h}{2(r_{\min} + \frac{h}{2})}; \quad (1)$$

где  $h$  - толщина образца.

При этом возникает проблема в определении минимального радиуса срединной поверхности полосы, по которому определяют предельную деформацию разрушения. Во-первых, определение параметров процесса и геометрии образца необходимо производить в момент начала разрушения, чтобы разгрузка, которой сопровождается процесс разрушения, не изменила кривизну поверхности в области трещин. Во-вторых, за счет неприлегания образца к поверхности пуансона, требуется более точное определение кривизны полосы в очаге разрушения.

Обе задачи решаются методами автоматизации процессов измерений. На установке закрепляются электронные датчики усилия и перемещения, и в процессе нагружения образца в режиме реального времени записывается диаграмма изгиба в координатах: изгибающее усилие – перемещение пуансона. В момент, когда начинается падение нагрузки, опыт прекращают. Проблему точного определения радиуса кривизны изогнутой полосы в месте образования трещин решают измерением контура образца.

Расчет предельной деформации разрушения в срединной поверхности полосы выполняют по следующему алгоритму/1/. Пусть известны толщина образца  $h$  и радиус его кривизны на наружной поверхности в момент начала разрушения изогнутого образца  $R$ . Кривизна срединной поверхности при разрушении определяется по формуле

$$\kappa = \frac{1}{R - h/2}. \quad (2)$$

Задаются достаточно малым шагом измерения кривизны срединной поверхности при разрушении

$$d\kappa = \frac{k}{n}; \quad (3)$$

где  $n$  – число разбиений (обычно  $n \geq 100$ ). Определяют кривизну на каждом шаге приращения

$$\kappa(i) = \kappa(i-1) + d\kappa; \kappa(0) = 0. \quad (4)$$

Радиус кривизны срединной поверхности на  $i$ -м этапе расчета равен

$$r_0(i) = \frac{1}{\kappa(i)}. \quad (5)$$

Смещение нейтральной оси относительно срединной поверхности вычисляется по формуле

$$s(i) = r_0(i) - \frac{h}{\ln\left(\frac{r_0(i) + h/2}{r_0(i) - h/2}\right)}. \quad (6)$$

Затем находят радиус кривизны нейтрального слоя

$$R(i) = r_0(i) - s(i), \quad (7)$$

удаление наружной поверхности от нейтрального слоя

$$y(i) = s(i) + \frac{h}{2} \quad (8)$$

и вычисляют приращение деформации наружного слоя

$$de(i) = \frac{y(i)d\kappa_0(i)}{r_0(i) + y(i)}. \quad (9)$$

Эквивалентная деформация разрушения находится как сумма этих приращений деформаций

$$e^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^n de(i). \quad (10)$$

Логарифмическую пластическую деформацию ячеек в продольном направлении  $e_1$  к оси образца определяют с учетом кривизны поверхности по вычисленному ранее радиусу кривизны. Предельную эквивалентную деформацию разрушения вычисляют по формуле

$$e^* = \frac{2}{\sqrt{3}} e_1 \sqrt{1 + \alpha + \alpha^2}. \quad (11)$$

Экспериментальное значение деформации разрушения (11) сравнивали с расчетным значением (10), вычисленным по описанному выше алгоритму.

В ходе испытаний армированного пластика было выявлено, что значение эквивалентной деформации при испытании приталенных образцов оказалась меньше значения эквивалентной деформации изогнутой широкой полосы на 3,8 %. Это обстоятельство позволяет сделать предположение о различии механизма разрушения пластмасс при растяжении и изгибе и его влиянии на предельные деформационные свойства. Например, при изгибе армированных пластиков происходит совместное деформирование армирующих волокон и основного вещества, а во время растяжения при достижении критической деформации начинается вырывание армирующих волокон из основного вещества, что значительно снижает величину предельной деформации материала.

Для проверки этой гипотезы провели конечно-элементное моделирование изгиба полосы в среде [ABAQUS/Explicit](#). Моделировались два варианта изгиба полосы: с имитацией вырывания волокон и без имитации вырывания волокон.

Модель экспериментального образца и установки в обоих случаях полностью повторяют форму и размеры образца и установки в натурном эксперименте. Взаимодействие установки и образца в эксперименте воспроизводится в моделирование с помощью задания контакта с соответствующими коэффициентами трения. Скорость приложения нагрузки в моделирование приводится в соответствие к скорости деформирования в эксперименте.

Моделирование изгиба полосы без имитации вырывания волокон выполнялись с использованием кривых течения исследуемого материала, полученных по результатам испытаний на одноосное растяжение в условиях квазистатического и динамического нагружения и транслированных на диапазон скоростей  $0,0001 \div 1 \text{ с}^{-1}$ .

Модель образца, имитирующая вырывание армирующих волокон из матрицы, имела две зоны: верхний слой, в котором реализуется растяжение и нижний слой, в котором возникает сжатие. Два слоя связаны, что обеспечивает совместное деформирование. Для описания поведения материала при пластических деформациях в верхнем слое использовались кривые течения, полученные по результатам испытания на растяжение, в нижнем слое – кривые течения по результатам испытания на сжатие.

Для имитации вырывания волокон наполнителя из матрицы Г.Д. Делем [2] была предложена кривые течения со ступенчатым падением напряжения, как показано на рисунке 2.

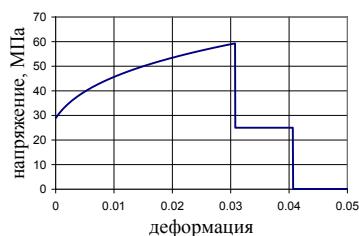
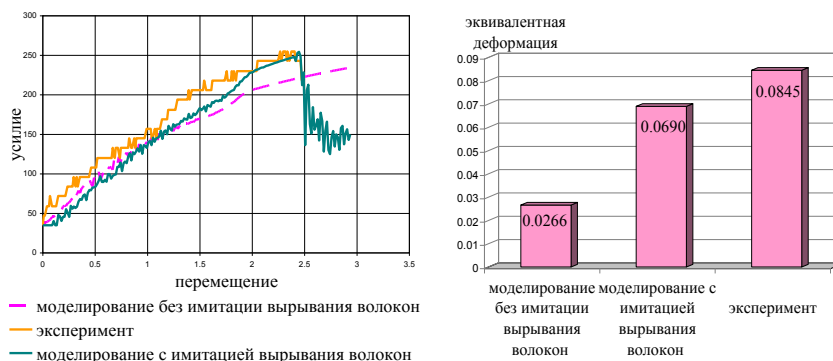


Рисунок 2 – Кривая течения, имитирующая вырывание волокон наполнителя из матрицы

В обоих расчетах использовали модели анизотропного материала с изотропным упрочнением, зависящим от скорости деформирования.

Результаты численных экспериментов и натурного испытания приведены на рисунке 3.



а – диаграмма усилие – перемещение б – значения эквивалентных деформаций

Рисунок 3 – Сравнение результатов моделирования и натурного испытания

Анализ результатов показал, что расчет, выполненный с использованием модели, имитирующей вырывание армирующих волокон, дает более точное совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей в области больших пластических деформаций, предшествующих разрушению. Понимание механизма разрушения армированных пластиков дает возможность создания модели материала, для определения предельных деформаций армированных пластиков в условиях квазистатического и динамического нагружения.

#### Литература

1. Дель Г.Д. Технологическая механика/Г.Д. Дель. М.: Машиностроение, 1978. 174с.
2. G. Oberhofer, H. Dell “Modelling short-fibre reinforced polymers with MF GenYld + CrachFEM for impact simulations”, Proceedings of the 1st MATFEM Conference, 26 October 2010, Schloss Hohenkammer