

Теоретико-экспериментальный анализ разделения элементов конструкций при локальном импульсном нагружении*

Ю. С. Воробьев^а, А. В. Колодяжный^а, М. В. Чернобрышко^а, В. Г. Ярещенко^а, Л. Крушка^б

^а Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина

^б Военно-техническая академия, Варшава, Польша

Разделение элементов конструкций рассматривается как высокоскоростное направленное локализованное разрушение объекта в области специально нанесенного концентратора. Объектами разрушения служили элементы в форме пластин или оболочек произвольной кривизны. Расчеты проводились с помощью явных конечно-разностных методов. Результаты работы нашли практическое использование.

Ключевые слова: локальные импульсные нагрузки, импульсное разделение, динамическая теория пластичности, динамические свойства материала, концентраторы.

Введение. Системы разделения, использующие источники энергии импульса, находят широкое применение в современной технике. Эффективность действия систем такого типа зависит от уровня эксплуатационной надежности ее компонентов. При изучении поведения систем разделения целесообразно использовать комплексный теоретико-экспериментальный подход.

Общая характеристика процесса разделения. Рассматривается задача о разделении пластин или оболочек произвольной кривизны (рис. 1) по заданному контуру 1, вдоль которого на поверхность элемента нанесен концентратор 2. Разделение происходит в результате интенсивного кратковременного воздействия импульсным энергоносителем 3. Как правило, энергоноситель расположен с противоположной стороны концентратора и повторяет его контур.

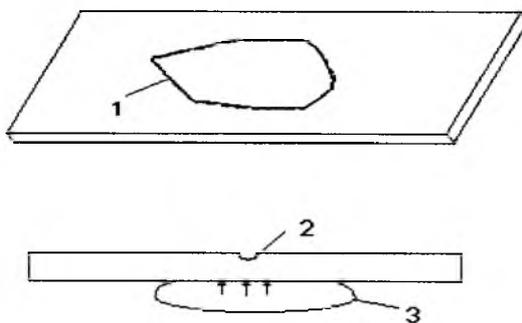


Рис. 1. Элементы системы разделения.

* Доклад на IV Международном симпозиуме “Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций при импульсном нагружении” (IMPULSE-2001).

Для описания процесса разделения используются математические модели различного уровня: балка-полоса Бернулли–Эйлера, пластины и оболочки типа Тимошенко и трехмерная сплошная среда с переменными границами зон активной деформации. Первые две модели применяются в сочетании с динамической деформационной теорией пластичности, а трехмерная модель – с теорией течения Прандтля [1].

Динамические свойства материала описываются зависимостями между напряжениями, деформациями и скоростями деформаций. Эти зависимости основаны на экспериментальных исследованиях динамических свойств конструкционных материалов различными методами (с помощью стержня Гопкинсона и при ударном растяжении коротких образцов на пневматическом копре с использованием средств широкополосного динамического тензометрирования) [2, 3].

При расчете применялись явные конечно-разностные методы. Процесс разделения состоит из двух стадий. На первой стадии происходит процесс зарождения трещины в концентраторе, на второй – ее рост и распространение по толщине элемента. В каждый момент времени проводится анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) с помощью комплекса обобщенных критериев прочности и развития разрушения [1]. Результаты расчетов показали, что трещина зарождается на поверхности концентратора и распространяется по толщине элемента с половинной скоростью волны Рэлея, а вдоль концентратора – со скоростью детонации или волны нагружения. Скорость распространения трещины во втором случае значительно выше, чем в первом. Поэтому можно полагать, что вдоль концентратора характер распространения трещины не изменяется, и рассматривать не трехмерное, а плоское деформированное состояние.

Использование комплекса различных математических моделей позволяет уточнить условие зарождения трещины, а затем оптимизировать условия ее прохождения по всей толщине элемента. Весьма важно установить минимальный заряд, обеспечивающий надежное разделение [4].

Экспериментальные исследования процессов разделения проводились на основе метода широкополосного многоканального тензометрирования с помощью оригинальной аппаратуры [3]. Полученные результаты использовались как для определения динамических свойств материалов, так и для оценки параметров импульсного нагружения и анализа характера деформационного состояния в окрестности концентратора вдоль траектории магистральной трещины (рис. 2).

Результаты исследований по разделению конструктивных элементов.

Проведены исследования по изучению характера НДС, локализуемого около концентратора и по траектории магистральной трещины, а также параметров импульса давления. Метод широкополосного многоканального тензометрирования основан на принципе равномерной широкополосности по всему пути прохождения измеряемого импульсного сигнала. Применяются тензорезисторы с малой базой ($b = (0,5 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$ м) и диапазоном измерения деформаций $\varepsilon = 10^{-6} \dots 10^{-2}$, тензоусилители, работающие по принципу амплитудной модуляции с подачей на измеряющие мосты пере-

менного напряжения частоты 2 МГц и рабочих частот в интервале $20 \dots 4 \cdot 10^5$ Гц. Используются аналогово-цифровые преобразователи с частотой дискретизации 40 МГц с управлением, регистрацией и обработкой данных эксперимента на ПЭВМ. Ниже приводятся результаты эксперимента, в процессе которого установлено, что главная трещина развивается в условиях плоской деформации, независимо от кривизны контура разделения, что объясняется большой скоростью детонации взрывчатого вещества в линейном устройстве разделения (вдоль линии концентратора).

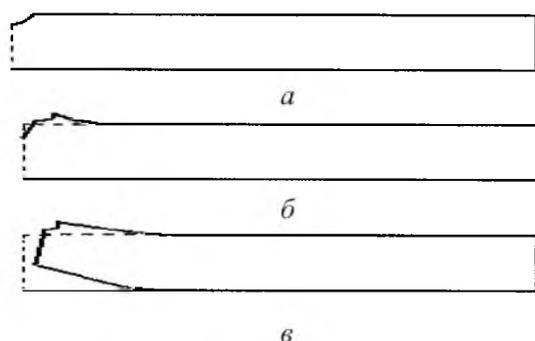


Рис. 2. Стадии разрушения вблизи концентратора: а – $t = 2$ мс; б – $t = 6$ мс; в – $t = 10$ мс.

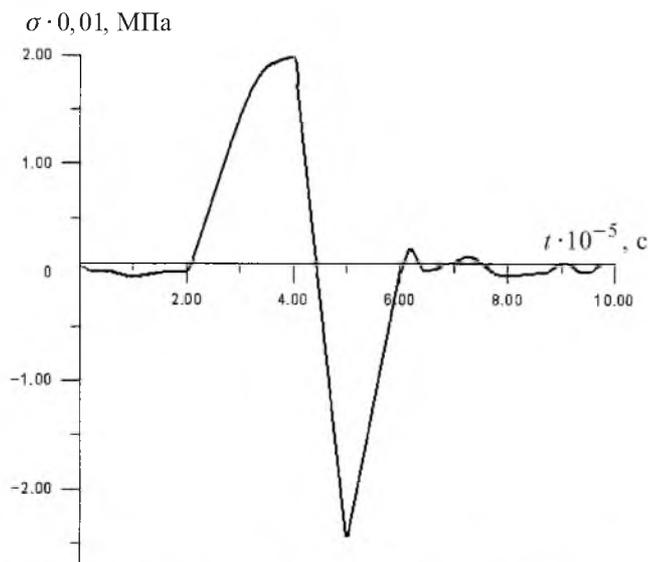


Рис. 3. Изменение напряжений при образовании трещины.

Характер НДС и максимальные деформации определены в объекте разделения на стадии активного нагружения и релаксации волн напряжения при формировании свободной поверхности развивающейся магистральной трещины (рис. 3). На рис. 3 показано изменение напряжений на некотором расстоянии ($x = 2,5$ см) от трещины в направлении, нормальном к плоскости ее раскрытия. В момент образования трещины развиваются растягивающие напряжения. Однако в процессе ее прохождения по толщине элемента эти

напряжения падают до нуля, изменяются на сжимающие, достигают уровня динамического предела текучести и за малый период релаксируют до нуля. Такие динамические напряжения под действием импульсных нагрузок имеют место при разделении частей космических аппаратов в результате срабатывания разделительных пироболтов.

Для экспериментального определения нагрузки на объекте разделения использовался стенд, оснащенный упругими стержнями-волноводами из материала с высоким динамическим пределом текучести ($\sigma_s = 3,6$ ГПа). По результатам, полученным в ходе эксперимента, была построена зависимость импульса давления в элементе разделения от времени (рис. 4).

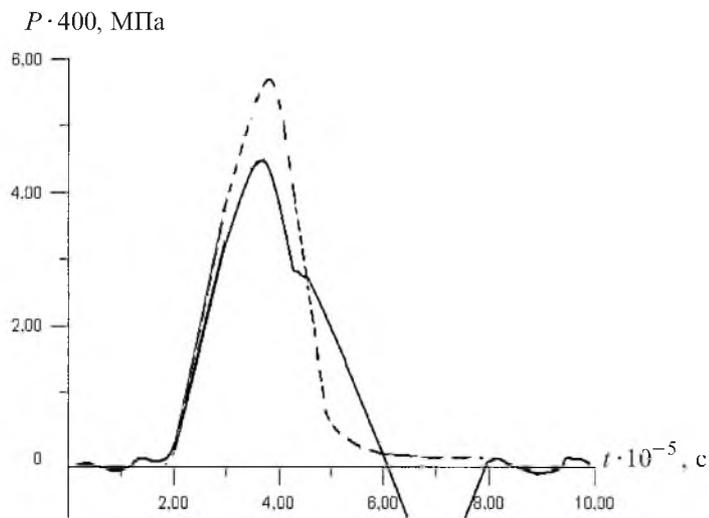


Рис. 4. Временная зависимость импульса давления в элементе разделения. (Сплошная линия – экспериментальные данные; штриховая – расчетные.)

Заключение. Экспериментально и теоретически изучен процесс разделения элементов с концентратором при импульсном нагружении.

Результаты использованы при утилизации корабельной стали, разделении секций космических аппаратов и вырубке аварийных люков в цельно-металлической обшивке аэрокосмических аппаратов.

Резюме

Поділ елементів конструкцій розглядається як високошвидкісне спрямоване локалізоване руйнування об'єкта в області спеціально нанесеного концентратора. Об'єктами руйнування є елементи у формі пластин або оболонок довільної кривизни. Розрахунки проводилися за допомогою явних скінченно-різницевого методів. Результати роботи знайшли практичне використання.

1. Vorob'ev Yu. S. and Sevryukov V. I. Separation of construction elements at impulse loading // Proc. of the Third Int. Conf. "Computational Plasticity" (Barcelona, Spain, 1992). – Barcelona, 1992. – P. 1883 – 1890.

2. *Kruszka L. and Nowacki W. K.* New application of the Hopkinson pressure and bar technique to determinating dynamic behavior of materials // *Mech. Teoret. i Stosowana.* – 1996. – 2, No. 34. – P. 259 – 280.
3. *Воробьев Ю. С., Колодяжный А. В., Севрюков В. И., Янютин Е. Г.* Скоростное деформирование элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
4. *Колодяжный А. В., Чернобрышко М. В., Яреценко В. Г.* Скоростное деформирование тонкостенных конструктивных элементов // *Вест. Харьк. гос. политехн. ун-та.* – 1996. – Вып. 11. – С. 8 – 13.

Поступила 12. 11. 2001