

УДК 539.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИН С ТРЕЩИНАМИ

В.М. Волков, А.Е. Жуков

Нижний Новгород

Рассмотрены задачи теоретического и экспериментального исследования устойчивости равновесия тонких упругих прямоугольных пластин с трещинами различной ориентации. Найдены зависимости критического напряжения пластин от длины содержащихся в них трещин.

Введение

Дефекты типа трещин, возникающие в пластинах в процессе эксплуатации конструкции, оказывают значительное влияние на способность пластин сопротивляться выпучиванию при сжатии.

Причиной появления трещин служат различные физические, механические, технологические и эксплуатационные факторы. Таким образом, при расчетах конструкций необходимо учитывать возможность зарождения трещин, их последующее развитие и оценивать влияние развивающихся трещин на поведение конструкции. Учитывая актуальность проблемы устойчивости пластин с дефектами, аналитические и экспериментальные исследования ее были проведены в работах [1–3]. Тем не менее, вопрос этот исследован недостаточно полно.

В данной работе рассмотрено влияние относительного размера центральной трещины на устойчивость в малом прямоугольной пластины при одноосном сжатии. Трещина располагается вдоль или поперек сжимающих напряжений. Теоретическое решение проводилось методом конечных элементов (МКЭ). Экспериментальные исследования выполнены на специальной установке.

Расчет устойчивости пластин методом конечных элементов

На первом этапе в силу симметрии нагрузки и граничных условий при решении рассматривалась четверть пластины, то есть трещина фактически выносилась на внешний контур модели, что делало возможным моделирование трещины путем изменения условий опирания части содержащей ее кромки. Последовательно снимая ограничения соответствующих перемещений в узлах, можно варьировать относительную длину трещины от 0 до 1 с шагом, кратным шагу конечно-элементной сетки. Граничные условия на наружных кромках – свободное опирание или жесткая заделка. Граничные условия на "внутренних" кромках задавались в соответствии с рассматриваемой формой потери устойчивости пластины в целом. Влияние толщины пластины не учитывалось: при симметричных формах потери устойчивости имел место излом вдоль трещины (имитация шарниром), при антисимметричных формах берега трещины могли смещаться друг относительно друга. Использовались двумерные изгибные конечные элементы.

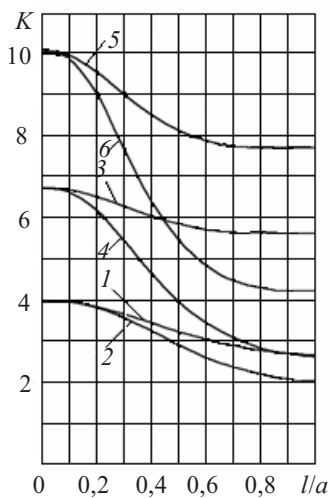


Рис. 1

Результатами расчетов явились графики зависимости коэффициента устойчивости K , входящего в хорошо известную формулу для эйлерова напряжения $\sigma_3 = K\pi^2 D / (b^2 h)$ (b – длина нагруженной стороны пластины, h – толщина пластины, D – цилиндрическая жесткость), от отношения l/a (l – длина трещины, a – длина параллельной трещине стороны пластины). На рис. 1 представлены зависимости, полученные для квадратной пластины с различными комбинациями опорных закреплений: 1, 2 – зависимости для свободно опертой по контуру пластины с трещиной вдоль и поперек сжимающих усилий соответственно; 3, 4 – нагруженные кромки пластины жестко заделаны, ненагруженные – свободно оперты; 5, 6 – жесткая заделка по контуру пластины.

На втором этапе исследований пластина рассматривалась целиком и учитывалась толщина пластины. Расчет проводился с использованием объемных твердотельных элементов. Трещина имитировалась прямоугольным отверстием. Для имитации взаимодействия берегов использовались контактные элементы.

Эксперимент

Для экспериментальной проверки полученных численных результатов была сконструирована установка, позволяющая в лабораторных условиях проводить исследования устойчивости плоской формы пластин из оргстекла с прямоугольным внешним контуром при статическом одноосном сжатии (рис.2). При создании установки учитывались рекомендации из работы [4]. Характеристики установки:

- габариты установки без нагружающего устройства – 660×300×460 мм;
- максимальная длина кромки испытываемой пластины – 300 мм;
- максимальная толщина испытываемой пластины – 5 мм;
- соотношение сторон испытываемой пластины – от 0,3 до 3;
- максимальный груз, прикладываемый к испытываемой пластине – 100 кг.

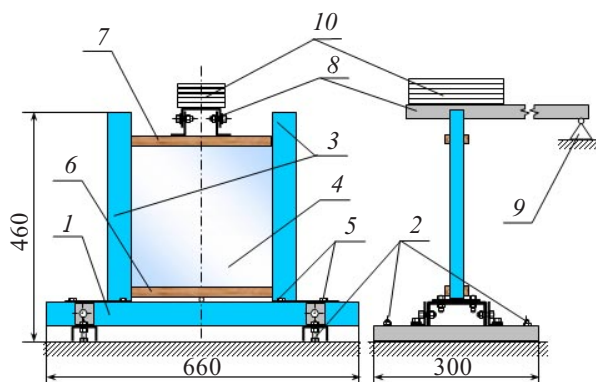


Рис. 2

Испытываемая пластина занимает в установке вертикальное положение. Нагрузка прикладывается к верхней горизонтальной кромке.

Основание установки 1 представляет собой систему швеллеров, соединенных между собой болтами. Регулировочные болты 2 позволяют выставить основание в строго горизонтальное положение. На основании располагаются стойки 3, являющиеся вертикальными опорами испытываемого образца 4. Стойка представляет собой металлический брус прямоугольного сечения с приваренной с одного конца бруса пластиной, позволяющей крепить стойку к основанию с помощью болтов. Брус имеет продольный паз для установки образца. Способ крепления стоек к основанию позволяет регулировать расстояние между ними в зависимости от размера образца. Регулировочные винты 5 позволяют добиться строго вертикального положения стоек. Неподвижная 6 и подвижная 7 горизонтальные опоры представляют собой металлические или деревянные бруски с пазами для установки образца. Нагружающее устройство 8 представляет собой размеченную горизонтальную балку (швеллер) длиной 2 м, одним концом жестко скрепленную с подвижной опорой 7 установки, а другим опирающуюся на шарнир 9. Швеллер служит площадкой для размещения грузов 10. Подбирая плечо, можно обеспечить нагружение с любым необходимым шагом.

Испытаниям были подвергнуты пластины, изготовленные из органического стекла номинальной толщиной 2; 2,5 и 3 мм. Кромки образца подвергались обработке, им придавалась закругленная форма. При испытаниях для устранения трения между пластиной и опорами применялась смазка. Трещина имитировалась двумя способами. При первом в пластине создавались V-образные пропилы, расположенные симметрично относительно срединной поверхности, при этом толщина оставляемого материала – "шейки" – строго контролировалась и не превышала 10% толщины пластины. При втором способе создавалась собственно трещина посредством удара зубилом по предварительно начерченному на образце направляющим. Первый способ использовался для проверки расчетов по двумерной модели.

Непосредственным результатом проведенного эксперимента были таблицы значений прогибов в центре пластины в зависимости от веса прикладываемых грузов. По данным таблиц для каждого испытания строились экспериментальные диаграммы "нагрузка–прогиб", после чего на этих диаграммах графически, методом Саусвелла–Доннелла [5] определялись критические значения прикладываемой нагрузки. В дальнейшем строилась зависимость критической нагрузки от длины трещины (пропила).

Результаты

Полученные экспериментальные данные оказались достаточно близки с теоретическими значениями для сплошной пластины, а также с результатами численных расчетов, выполненных для пластин с трещиной по двумерной и трехмерной моделям. Расхождение эксперимента с расчетом при имитации трещины двухсторонним V-образным пропилом не превысило 10%. Рис. 3 позволяет сопоставить кривые, полученные с помощью расчета МКЭ, с экспериментальными данными для квадратной свободно опертой пластины с трещиной вдоль и поперек сжимающих усилий.

Расчет с учетом толщины показал, что соответствующие зависимости при расположении трещины вдоль сжимающих напряжений практически идентичны най-

денным по двумерной модели, что подтверждено экспериментально.

Теоретические расчеты для случая расположения трещины поперек сжимающих усилий показали парадоксальные, на первый взгляд, результаты: с увеличением длины трещины критическая нагрузка пластины возрастает. Но эксперимент выявил аналогичную зависимость. Из рис. 4 видно, что экспериментальные точки, хоть и не ложатся строго на теоретическую кривую, однако имеют явную тенденцию к возрастанию.

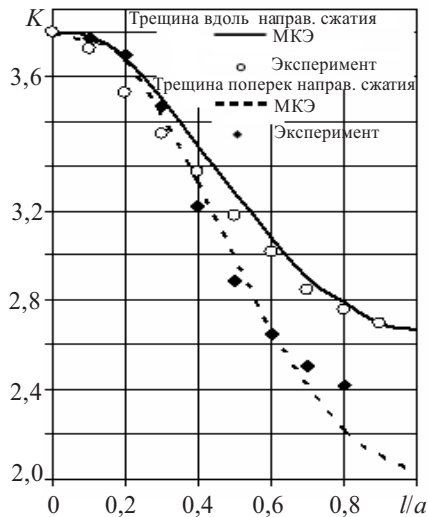


Рис. 3

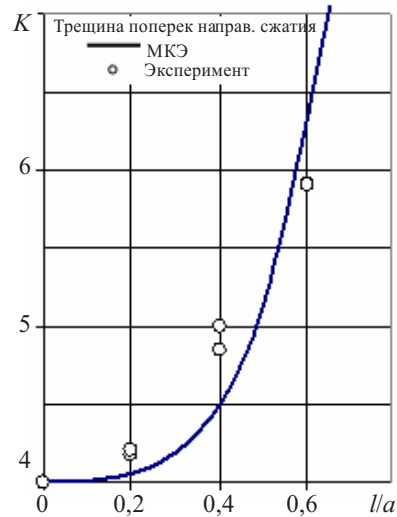


Рис. 4

Это явление может быть объяснено наличием момента, возникающего при контакте берегов трещины и распределенного по длине зоны контакта. При условии малых прогибов (в пределах половины толщины пластины) этот момент препятствует раскрытию трещины и, следовательно, выпучиванию пластины. С ростом трещины момент увеличивается, поэтому растет и критическая нагрузка пластины.

Литература

1. Михайлов, Б.К. Исследование устойчивости прямоугольных пластин с прямоугольными отверстиями при продольном сжатии / Б. К. Михайлов, В. Г. Москалева // Металлические конструкции: Межвуз. темат. сб. тр. / Ленингр. инж.-строит. ин-т. – 1983. – С. 14–21.
2. Грачева, Е.А. Устойчивость судовых пластин с трещинами / Грачева Е. А. // Механика разрушения и надежности судовых конструкций: Межвуз. сб. науч. трудов / Горьков. политехн. ин-т. – 1987. – С. 23–29.
3. Shakerley, T.M. Elastic buckling of plates with eccentrically positioned rectangular perforations / T. M. Shakerley, C. J. Brown // Int. J. Mech. Sci.–1996. – V. 38, N.8–9. – С. 825–838.
4. Налоев, В.Г. Некоторые вопросы устойчивости судовых пластин с вырезами: дис... канд. техн. наук: 05.221: защищена 23.11.72; утв. 09.03.73 / Налоев Валерий Георгиевич. – Горький, 1972.– 230 с.
5. Саусвелл, Р.В. Введение в теорию упругости для инженеров и физиков / Р. В. Саусвелл. – М.: Мир, 1948. 676 с.

[05.09.2007]

**THE EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCHES
OF STABILITY OF PLATES WITH CRACKS**

V.M. Volkov, A.E. Zhukov

The problems of theoretical and experimental research of stability of thin elastic rectangular plates with various orientation cracks are considered. Dependences of a critical load of plates on length of cracks containing in them are found.