

УДК 539.4

В.М. Волков, А.Е. Жуков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СУДОВЫХ ПЛАСТИН С ЦЕНТРАЛЬНЫМИ СКВОЗНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Методами теоретического и экспериментального исследования рассмотрены проблемы продольного изгиба тонких прямоугольных пластин с различным расположением трещин. Установлены зависимости критических нагрузок на пластины в зависимости от протяженности трещин.

*Ключевые слова:* продольный изгиб, тонкие прямоугольные пластины, критические нагрузки, протяженность трещин.

### Введение

Дефекты типа трещин, возникающие в пластинах в процессе эксплуатации конструкции, оказывают значительное влияние на их способность 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, аналитическим и экспериментальным её исследования внимание уделялось неоднократно [1–3]. Тем не менее, вопрос этот исследован недостаточно полно.

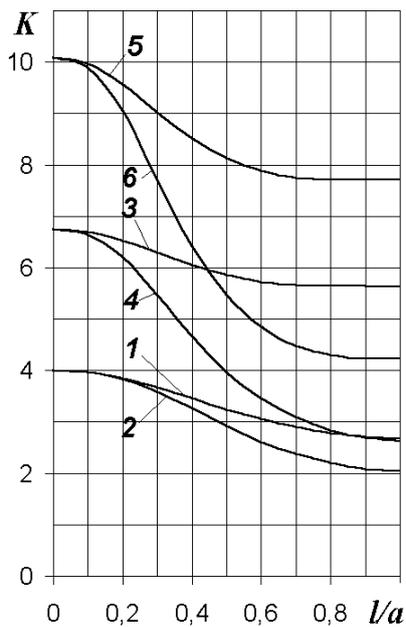
В данной работе рассмотрено влияние относительного размера центральной трещины на устойчивость в малой прямоугольной пластине при одноосном сжатии. Трещина располагается вдоль или поперек сжимающих напряжений. Теоретическое решение проводилось методом конечных элементов. Экспериментальные исследования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

### Расчет устойчивости пластин методом КЭ в линейной постановке

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 её 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. На первом этапе влияние толщины пластины не учитывается: 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.

Результатами расчетов явились графики зависимости коэффициента устойчивости  $K$ , входящего в хорошо известную формулу для эйлерова напряжения  $\sigma_{\text{э}} = K \frac{\pi^2 D}{b^2 h}$  (где  $b$  –

длина нагруженной стороны,  $h$  – толщина пластины,  $D$  – цилиндрическая жесткость), от отношения  $l/a$  ( $l$  – длина трещины,  $a$  – длина стороны, параллельной трещине). Рассматривались пластины с различными комбинациями опорных закреплений и разными отношениями сторон. Пример таких графиков показан на рис. 1.



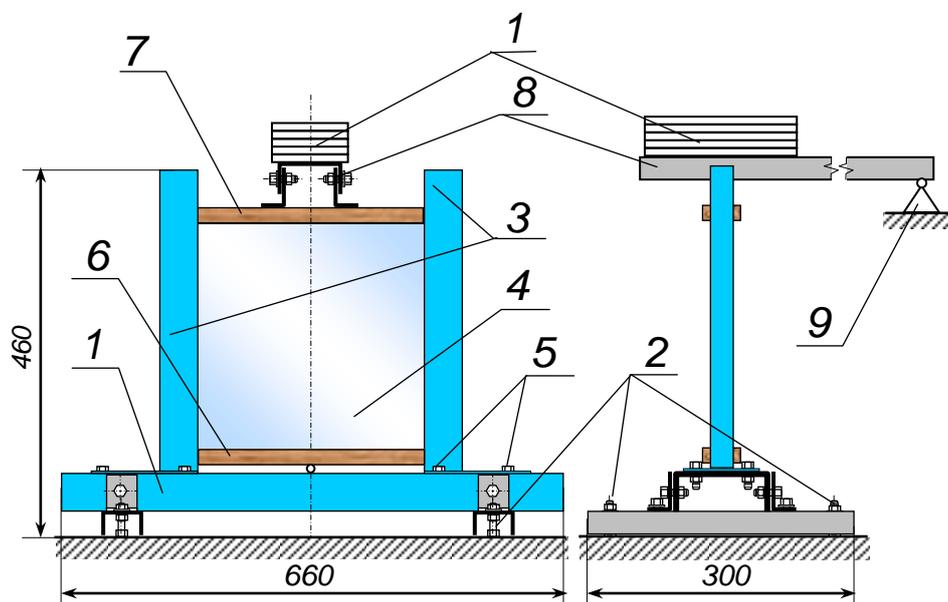
**Рис. 1. График зависимости  $K$  от  $l/a$ :**  
1, 2 – свободно опертая по контуру квадратная пластина с трещиной вдоль и поперек сжимающих; 3, 4 – нагруженные кромки жестко заделаны, ненагруженные – свободно оперты; 5, 6 – жесткая заделка по контуру

На втором этапе исследований 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 приведены в табл. 1.

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



**Рис. 2. Экспериментальная установка**

Основание установки 1 представляет собой систему швеллеров, соединенных между собой болтами. Регулировочные болты 2 позволяют выставлять 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 дает возможность 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, другим – опирается на ножевую опору 9. Швеллер служит площадкой для размещения грузов 10. Подбирая плечо, можно обеспечить нагружение с любым необходимым шагом.

Таблица 1

## Характеристики установки

Габариты установки без нагружающего устройства (длина×ширина×высота), мм	660×300×460
Максимальная длина кромки испытываемой пластины, мм	300
Максимальная толщина испытываемой пластины, мм	5
Соотношение сторон испытываемой пластины	от 0,3 до 3
Максимальный груз, прикладываемый к испытываемой пластине, кг	100

Испытаниям подвергались пластины, изготовленные из органического стекла номинальной толщиной 2, 2,5 и 3 мм. Кромкам образца 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 оставшегося 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.

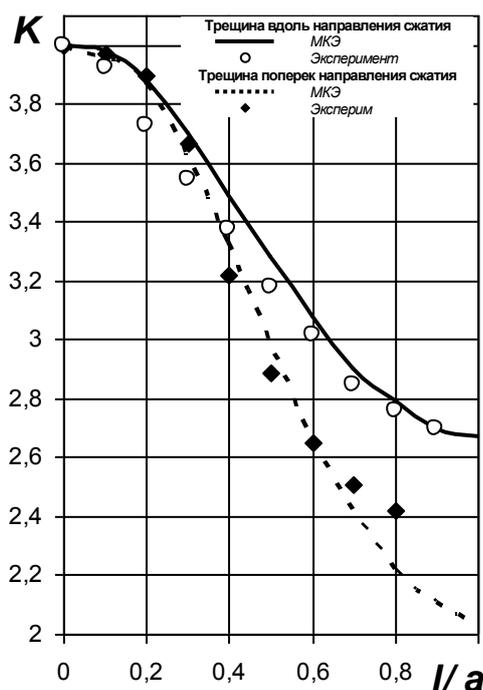


Рис. 3. Результаты, полученные МКЭ расчетом, и экспериментальные данные

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 по методу Саусвелла-Доннелла [5] определялись критические значения прикладываемой нагрузки. В дальнейшем строилась зависимость критической нагрузки от длины трещины (пропила).

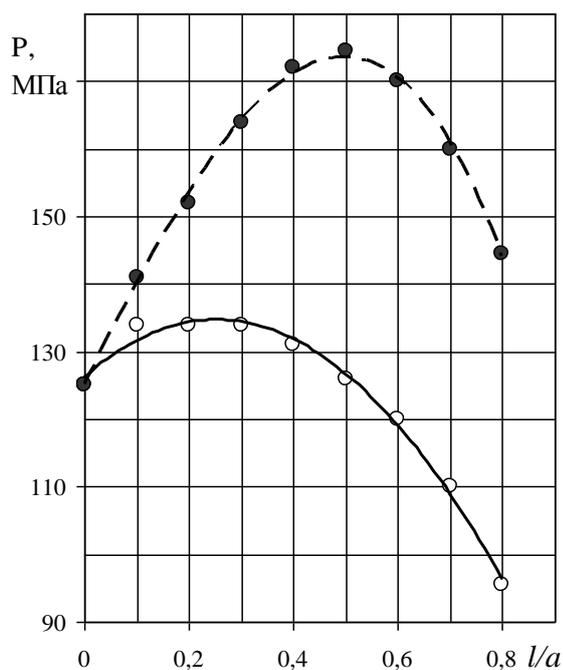
Испытания показали хорошую сходимость полученных результатов с теоретическими значениями для сплошной пластины, а также с результатами численных расчетов методом конечных элементов, проведенных для пластин с трещиной по двумерной и трехмерной моделям. Расхождение эксперимента с расчетом при имитации трещины двухсторонним V-образным пропилом не превысило 10%. На рис. 3 приведено сопоставление кривых, полученных с помощью расчета МКЭ, и экспериментальных точек 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 найденным по двумерной модели, что подтверждено экспериментально.

Теоретические расчеты для случая расположения трещины поперек сжимающих усилий показали, на первый взгляд, парадоксальные результаты: с увеличением длины трещины критическая нагрузка пластины возрастает. Но эксперимент показал схожую зависимость. На рис. 4 видно, что экспериментальные точки, хотя и не ложатся строго на теоретическую кривую, зависимость имеет явно возрастающий характер. 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, как следствие, растет и критическая нагрузка пластины.

### Исследование закритического изгиба судовых пластин с трещинами

На следующем этапе некоторые из задач, рассмотренных выше, были решены в нелинейной постановке. Другими словами, исследовался изгиб прямоугольных пластин, содержащих центральные сквозные трещины, расположенные вдоль и поперек сжимающих напряжений при одноосном сжатии при нагрузках, превышающих эйлерову, и прогибах, превышающих толщину пластины. Материал пластин в расчетах принимался изотропный и линейно упругий. Какие-либо элементы, подкрепляющие пластину (кроме опирания по кромкам) отсутствовали. Сжимающие усилия предполагались равномерно распределенными вдоль внешних нагруженных кромок. Контуры пластины при сжатии не искривлялись и оставались параллельными самим себе (сжатие со стеснением) – такое ограничение моделирует воздействие на пластину балок и других пластин в реальной конструкции (например, в обшивке судна). В качестве граничных условий принято свободное опирание. Учитывалось влияние толщины пластины. Задача также решалась методом конечных элементов. Критерием критической нагрузки являлось достижение заведомо назначенного прогиба в определенной точке пластины.



**Рис. 4. Аппроксимация зависимости критической нагрузки квадратной свободно опертой пластины от относительной длины трещины**

казана аппроксимация зависимости критической нагрузки квадратной свободно опертой пластины от относительной длины трещины, расположенной поперек сжимающих усилий (чёрные маркеры), а сплошной линией — для трещины, расположенной вдоль сжимающих усилий (белые маркеры). Как видно из представленных графиков, увеличение несущей способности пластины с ростом трещины, в случае учета контакта берегов, имеет место и при закритическом нагружении. Условия и степень проявления данного эффекта требуют дальнейшего изучения.

В результате расчетов на ЭВМ получены зависимости критической нагрузки прямоугольных свободно опертых пластин от относительной длины трещины, и от отношения длин сторон. На рис. 4 пунктирной линией показана

### Список литературы

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. – Л., 1983. С. 14–21.
2. **Грачева, Е. А.** Устойчивость судовых пластин с трещинами / Грачева Е. А. // Механика разрушения и надежности судовых конструкций. – Горький, 1987. С. 23–29.
3. **Shakerley, T. M.** Elastic buckling of plates with eccentrically positioned rectangular perforations / Shakerley T. M., Brown C. J. // Int. J. Mech. Sci. 1996. 38 N8–9. С. 825 – 838.
4. **Налоев, В.Г.** Некоторые вопросы устойчивости судовых пластин с вырезами. дисс... канд. техн. наук / В.Г. Налоев. – Горький, 1972.
5. **Саусвелл, Р.В.** Введение в теорию упругости для инженеров и физиков / Р. В. Саусвелл. – М., 1948.
6. **Жуков, А. Е.** Исследование устойчивости квадратных изотропных пластин, содержащих прямолинейные центральные трещины / А. Е. Жуков, В. Г. Налоев // Современные проблемы прикладной механики: труды НГТУ/ НГТУ. – Н. Новгород. 2004. Т. 43. С. 85–89.
7. **Жуков, А. Е.** Анализ устойчивости пластин с трещинами / А. Е. Жуков, В.Г. Налоев // Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве: материалы Всероссийской науч.-техн. Конференции / НГТУ. – Нижний Новгород. 2006. С. 425–428.
8. **Волков, В.М.** Предельная прочность, надежность и остаточный ресурс тонкостенных конструкций с повреждениями / В. М. Волков, А. А. Миронов, А. Е. Жуков // Надежность и ресурс в машиностроении: Вестник ВГАВТ. – Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ. 2006. Вып. 16. С. 36–52.

*Дата поступления  
в редакцию 09.02.2010*

**V. Volkov, A. Zhukov**

### THE RESEARCHES OF BEHAVIOUR OF PLATES WITH CENTRAL CRACKS

The problems of theoretical and experimental research of buckling 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.

*Key words:* buckling, thin elastic rectangular plates, critical load, length of cracks.