**I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН**

Воробьев Ю. С.

Овчарова Н. Ю.

*Институт проблем  
машиностроения  
им. А.Н. Подгорного  
НАН Украины*

Vorobiev Iu. S.

Ovcharova N. Iu.

*A.N. Podgorny Institute  
for Mechanical  
Engineering Problems  
of the National Academy  
of Sciences of Ukraine*

УДК 539.3

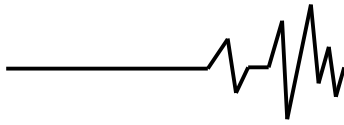
**ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ  
ВОЛНЫ НА ПРЯМОУГОЛЬНУЮ  
ПЛАСТИНУ С РАЗРЕЗОМ**

*Рассматривается динамическое деформированное состояние прямоугольных пластин с разрезами под действием ударной волны. Проведено сопоставление расчетных результатов, полученных с помощью метода конечных элементов (МКЭ), с экспериментальными, полученными с помощью тензометрических методов. Показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Выявлены особенности динамического деформированного состояния пластин вблизи вершин разрезов, вдоль берегов разрезов и на границах жесткого зацеplения. Результаты подтверждают возможность достоверных результатов при численном анализе на основе МКЭ тонкостенных конструкций с разрезами при воздействии кратковременных нагрузок.*

*Ключевые слова:* пластина с разрезом, ударная волна, МКЭ, сравнение с экспериментом.

**Введение.** Элементы транспортных средств, авиационно-космической техники, зданий и сооружений часто подвергаются воздействию ударных и ударно-волновых нагрузок. Элементы таких конструкций часто имеют вид прямоугольных пластин. Наличие разрезов или повреждений существенно изменяет картину напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при динамических нагрузках. Поэтому анализ особенностей скоростного деформирования элементов конструкций с разрезами представляет значительный интерес. Большинство исследований для динамики пластин с разрезами проводится с использованием численных и аналитических методов. При этом особенности НДС вблизи вершины разреза или трещины представляют наибольший интерес. Однако достоверность результатов исследований этих особенностей нуждается в проверке. С этой точки зрения большой интерес представляют работы [1-4], в которых приводятся результаты прямого экспериментального исследования деформированного состояния прямоугольных пластин с разрезами под действием ударной волны. Особое значение играет тот факт, что измерения деформаций осуществлялись системой тензодатчиков с малой базой (1 мм, 3

мм), что обеспечивает надежную информацию о деформациях с большими градиентами [2]. Кроме того системы датчиков расположены по линиям параллельным сторонам пластины, что дает достаточную информацию об изменении особенностей деформированного состояния пластины представляющего интерес. Расположение и размеры датчиков также позволяют получить информацию о концентрации напряжений в области вокруг вершины разреза. Ширина разреза составляет 0,5 мм, при этом вершина разреза имеет радиус 0,25 мм, что должно существенно влиять на локализацию напряжений. В данном случае вид и размеры пластины и разрезов, а также граничные условия были выбраны согласно данным работы [2], в которой представлены результаты экспериментальных исследований динамического деформированного состояния пластины с разрезами под действием ударной волновой нагрузки. Это дает возможность тестирования численных результатов, точность которых зависит от выбора конечно-элементной модели. Следует отметить, что результаты подобных экспериментальных исследований со всеми данными для расчетов встречаются довольно редко, так как анализ динамических напряжений при воздействии кратковременных



нагрузок на конструкции требует тщательных и трудоемких исследований.

**Постановка задачи и результаты исследований.** В работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований динамических деформаций в пластинах с разрезами под действием ударной волны. Проводятся численные исследования для пластины с разрезом глубиной  $u/a = 0.14$ , когда

локализация напряжений выражена наиболее явно. Рассматривается прямоугольная пластина в системе координат  $x$  и  $y$  с размерами: толщина  $h=2.5$  мм, ширина  $a=140$  мм и длина  $b=210$  мм, материал пластины стеклотекстолит плотность  $\rho = 1,7$  г/см<sup>3</sup>, модуль упругости  $E=2,6 \cdot 10^{10}$  Па. Пластина закреплена с двух сторон (рис.1). Посредине пластины имелся разрез шириной 0,5 мм [2].

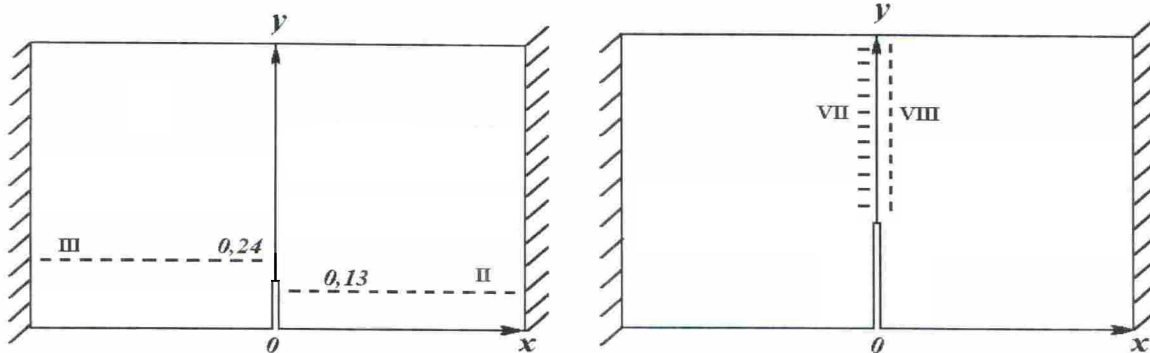


Рис. 1. Общая схема пластины

Пластина подвержена действию ступенчатой ударной волны длительностью  $t=8 \cdot 10^{-3}$  с, амплитудное давление которой на поверхность пластины составляло  $0.1 \cdot 10^5 \pm 5\%$  Па и равнялось давлению в отраженной волне. Рассматривается случай с глубиной разреза  $u/a = 0.14$ . Наиболее близко к вершине разреза располагались датчики на расстоянии  $u/a = 0.13$  (линия II) и  $u/a = 0.24$  (линия III). Для данной величины разреза  $u/a = 0.14$  наиболее характерными являются эпюры деформаций на рис. 4,б и 4,в статьи [2].

Расчеты проводились на основе конечно-элементной модели с трехмерными элементами SOLID 186, число которых было  $10^4$ . Причем вблизи вершины разреза размер элементов уменьшался в 10 раз. Данные элементы предназначены для задач динамики и хорошо описывали непрерывное изменение деформаций [5-8]. На рис. 2 показано сопоставление расчетных (сплошные линии с квадратами) и экспериментальных (пунктирные линии с ромбами) деформаций  $\varepsilon_x$  вдоль линии II, когда  $u/a = 0.13$ .

При этом датчики вблизи разреза располагались наиболее близко к его вершине, расположенной на расстоянии  $u/a = 0.14$ , но на небольшом расстоянии вдоль оси  $x$  от свободного края разреза. Поэтому наблюдается всплеск деформаций на расстоянии примерно 10 мм от края разреза и резкое падение деформаций по направлению к разрезу.

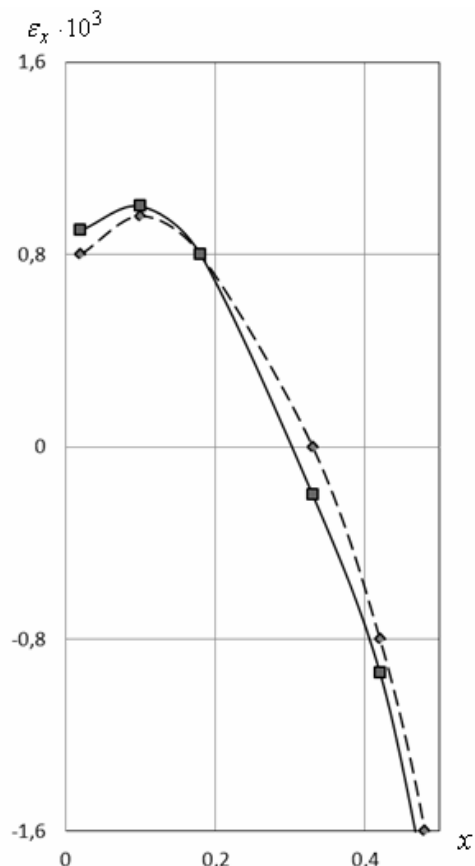
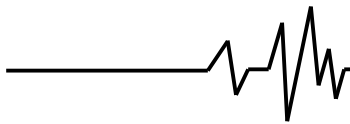
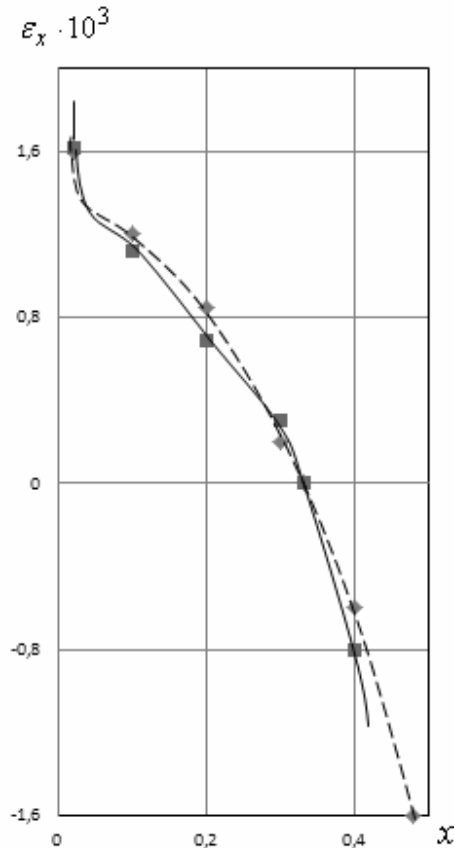


Рис. 2. Сопоставление расчетных (сплошные линии) и экспериментальных (пунктирные линии) деформаций  $\varepsilon_x$  вдоль линии II, когда  $u/a = 0.13$



На рис. 3 показано сравнение расчетных и экспериментальных результатов вдоль линии III, которая расположена выше вершины разреза на расстоянии  $y/a = 0.24$ .

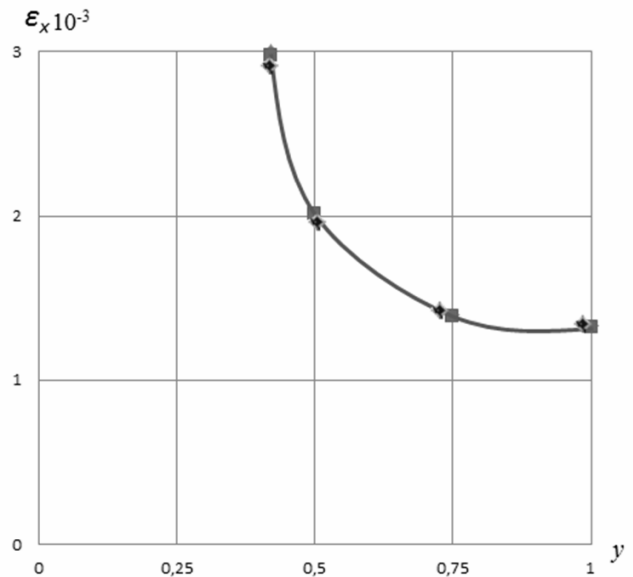


**Рис. 3. Сопоставление расчетных (сплошные линии) и экспериментальных (пунктирные линии) деформаций  $\epsilon_x$  вдоль линии III, когда  $y/a = 0.24$**

Здесь наблюдается резкий рост (локализация) деформаций  $\epsilon_x$  при приближении к области непосредственно над разрезом.

В обоих случаях наблюдается значительное увеличение деформаций  $\epsilon_x$  вблизи жесткого закрепления сторон пластины. Наибольшее расхождение численных и экспериментальных результатов наблюдается в области значений деформаций  $\epsilon_x$ , близких к нулю (рис.2, 3).

На рис. 4 показано изменение деформаций  $\epsilon_x$  вдоль линии VII при глубине выреза  $y/a = 0.37$ .



**Рис. 4. Изменение деформаций  $\epsilon_x$  вдоль линии VII**

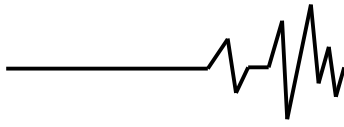
Видна локализация деформаций вблизи вершины разреза. При этом на графиках расчетные и экспериментальные результаты практически сливаются. Поэтому приводится сопоставление теоретических и экспериментальных данных в таблице (табл. 1).

**Сравнение экспериментальных и расчетных результатов для деформации  $\epsilon_x$**

$y$	$\epsilon_x$ эксперимент	$\epsilon_x$ расчет
0,42	3	2,9791
0,5	2	2,0111
0,75	1.73	1,3926
1	1.33	1,3217

Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов показывает их достаточно хорошее совпадение с числом

трехмерных конечных элементов, которое не является очень высоким.

**Выводы**

Использование метода конечных элементов с сеткой трехмерных конечных элементов позволяет получить достоверные результаты о распределении динамических деформаций в пластинах с разрезами под действием ступенчатой ударной волны. Показаны особенности деформированного состояния пластины с разрезом вблизи вершины разреза, вдоль берегов разреза и на границах жесткого защемления. Характер эпюр деформаций соответствует ожидаемому согласно физическому смыслу задачи. Результаты исследований показывают возможность достоверного анализа динамического напряженно-деформированного состояния элементов тонкостенных конструкций с разрезами при кратковременных нагрузках.

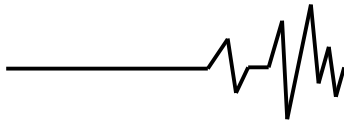
**Список использованных источников**

1. Аникьев И.И. Экспериментальное исследование деформирования тонких пластин при статическом нагружении и при взаимодействии их с ударной волной / И.И. Аникьев, М.И. Михайлова, А.С. Спировский, А.Л. Тимофеев // Прикл. механика. – 1983. – 19, №10.- С. 89 – 94.
2. Аникьев И.И. Деформирование упругой пластины с краевым разрезом при падении плоской ударной волны - экспериментальное исследование / И.И. Аникьев, М.И. Михайлова, Е.А. Сущенко // Прикл. механика. – 2009. – 45, №11.- С. 115 – 121.
3. Anik'ev I.I. Nonstationary deformation of an elastic plate with a notch under the action of a shock wave / I.I. Anik'ev, M.I. Mikhailova, E.A. Sushchenko // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, №11. – P. 1264 – 1268.
4. Гузь А.Н. Экспериментальные исследования тонкостенных конструкций / А.Н. Гузь, В.А. Заруцкий, И.Я. Амиро и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 с.
5. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: ЛЕНАНД. 2010. – 456 с.
6. Воробьев Ю.С. Проблемы анализа скоростного деформирования элементов конструкций при импульсном нагружении. / Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Ярышко А.В., Степанченко Д.И., Евченко Н.Ю. // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: НАКУ «ХАИ» – 2007. 11 (47). – С. 35 – 43.

7. Воробьев Ю., Чернобрышко М., Овчарова Н. Анализ скоростного деформирования элементов конструкций на основе МКЭ. // Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania: X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Materialy konferencyjne (Kazimir Dolny, 13-16 listopada 2007). – 2007. – P.1 – 7.
8. Vorobiov Y. Strain rate deformation and damage of structural elements under local impulse loadings / Y. Vorobiov, M. Chernobryvko, L. Kruszka // Military University of Technology. – Warsaw. – 2010. – P. 679 – 687.
9. Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова, Динамика элементов конструкций при ударных нагрузках // Вибрации в технике и технологиях, № 2(74). – 2014 г. С. 5 – 11.

**Список источников в транслитерации**

1. Anik'yev I.I. Eksperimental'noye issledovaniye deformirovaniya tonkikh plastin pri staticheskom nagruzhении i pri vzaimodeystvii ikh s udarnoy volnoy / I.I. Anik'yev, M.I. Mikhaylova, A.S. Spisovskiy, A.L. Timofeyev // Prikl. mekhanika. – 1983. – 19, №10.- S. 89 – 94.
2. Anik'yev I.I. Deformirovaniye uprugoy plastiny s krayevym razrezom pri padenii ploskoy udarnoy volny - eksperimental'noye issledovaniye / I.I. Anik'yev, M.I. Mikhaylova, Ye.A. Sushchenko // Prikl. mekhanika. – 2009. – 45, №11.- S. 115 – 121.
3. Anik'ev I.I. Nonstationary deformation of an elastic plate with a notch under the action of a shock wave / I.I. Anik'ev, M.I. Mikhailova, E.A. Sushchenko // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, №11. – P. 1264 – 1268.
4. Guz' A.N. Eksperimental'nyye issledovaniya tonkostennykh konstruktсий / A.N. Guz', V.A. Zarutskiy, I.YA. Amiro i dr. – K.: Nauk. dumka, 1984. – 240 s.
5. Morozov Ye.M. ANSYS v rukakh inzhenera. Mekhanika razrusheniya / Ye.M. Morozov, A.YU. Muiyemnek, A.S. Shadskiy. – M.: LENAND. 2010. – 456 s.
6. Vorob'yev YU.S. Problemy analiza skorostnogo deformirovaniya elementov konstruktсий pri impul'snom nagruzhении. / Vorob'yev YU.S., Chernobryvko M.V., Yaryzhko A.V., Stepanchenko D.I., Yevchenko N.YU. // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – Khar'kov: NAKU «KHAI» – 2007. 11 (47). – S. 35 – 43.
7. Vorob'yev YU., Chernobryvko M., Ovcharova N. Analiz skorostnogo deformirovaniya elementov konstruktсий na osnove MKE. // Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania: X Jubileuszowa



Konferencja Naukowo-Techniczna. Materiały konferencyjne (Kazimierz Dolny, 13-16 listopada 2007). - 2007. - P.1 - 7.

8. Vorobiov Y. Strain rate deformation and damage of structural elements under local impulse loadings / Y. Vorobiov, M. Chernobryvko, L. Kruszkka // Military University of Technology. - Warsaw. - 2010. - P. 679 - 687.

9. YU.S. Vorob'yev, N.YU. Ovcharova, Dinamika elementov konstruktsiy pri udarnykh nagruzkakh // Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh, № 2(74). - 2014 g. S. 5 - 11.

### ВПЛИВ УДАРНОЇ ХВИЛІ НА ПРЯМОКУТНУ ПЛАСТИНУ З РОЗРІЗОМ

**Анотація.** Розглядається динамічний деформований стан прямокутних пластин з розрізами під дією ударної хвилі. Проведено зіставлення розрахункових результатів, отриманих за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ), з експериментальними, отриманими за допомогою тензометричних методів. Показано гарна відповідність розрахункових і експериментальних результатів. Виявлено особливості динамічного деформованого стану пластин поблизу вершин розрізів, уздовж берегів розрізів і на межах жорсткого зацмлення. Результати підтверджують можливість

достовірних результатів при чисельному аналізі на основі МСЕ тонкостінних конструкцій з розрізами при дії короточасних навантажень.

**Ключові слова:** пластина з розрізом, ударна хвиля, МСЕ, порівняння з експериментом.

### EFFECTS OF SHOCK WAVES ON A RECTANGULAR PLATE WITH THE CUT

**Annotation.** The dynamic strain state of the rectangular plates with cuts under the action of the shock wave are considered. The comparison of calculated results obtained by the finite element method (FEM), with the experimental ones obtained by using strain measurement are conducted. It is shown the good agreement between calculated and experimental results. Comparison of theoretical and experimental results are presented in graphs and table. The features of dynamic strain state of the plates near the top of the cuts, along the coast cuts and on the borders of rigid support are revealed. The results confirm the possibility of reliable results in a numerical analysis based on the finite element method of thin-walled structures with cuts under the action of short-term load.

**Key words:** plate with the cut, the shock wave, FEM, comparison with experiment.