

И. И. Аникьев, М. И. Михайлова, Е. А. Сущенко

ВЛИЯНИЕ НАКЛАДКИ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ С КРАЕВЫМ РАЗРЕЗОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: desc@inmech.kiev.ua*

Abstract. A behavior of thin elastic plate with edge notch is studied experimentally. The weak shock wave in air acts on the plate. The notch has a joint bar at the top of notch or at its commencement. An effect of joint bar on the process of deformation is shown.

Key words: thin elastic plate, edge notch, weak shock wave, process of deformation.

Введение.

В различных областях техники широко используются элементы конструкций, в которых существуют различные технологические или приобретенные в результате эксплуатации неоднородности типа отверстий, вырезов, трещин или разрезов. Изучению влияния неоднородностей указанных типов на деформированное состояние, колебания, устойчивость и разрушение конструкций или их элементов посвящено большое число научных работ.

Отметим некоторые публикации последних лет. В [1] получены поля напряжений в моделях балок с различным числом и глубиной трещин – разрезов. Обсуждается возможность управляемого перераспределения напряжений. Изучению вибрационных процессов в пластинах с вырезами и трещинами посвящены [3, 7]; влияние отверстий различной формы на деформированное состояние объектов отражено в [5, 9, 10, 13]. В [6, 11] проведен нелинейный анализ деформирования оболочек с отверстиями и жёсткими включениями. Влияние трещин на деформации и разрушение рассмотрено в [8, 14, 15]. Регистрация деформаций тонкой упругой пластины с краевым разрезом под действием ударной волны показала зависимость периода колебаний от длины разреза, а также существенное влияние разреза на деформированное состояние пластины в момент развития максимальных деформаций [4]. В последние годы опубликованы результаты исследований, в которых дан анализ возможностей восстановления конструкций с помощью различного рода накладок, перекрывающих отверстие или трещину. В [2] рассмотрено усиление пластин с отверстиями круговой и эллиптической форм с помощью накладок, присоединенных к пластине жестко вдоль всей границы отверстий. Поведение при нагружении стальных пластин, имеющих трещину, упрочненную углепластиком, исследовано в [12] с применением метода конечных элементов. Гранично-элементное моделирование восстановления листов с трещиной с помощью анизотропных накладок рассмотрено в [15].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования влияния накладки малого размера (по сравнению с длиной краевого разреза) на деформированное состояние пластины при нормальном падении на одну из её поверхностей длинной ударной волны. Деформированное состояние пластины определено в момент развития максимальных деформаций.

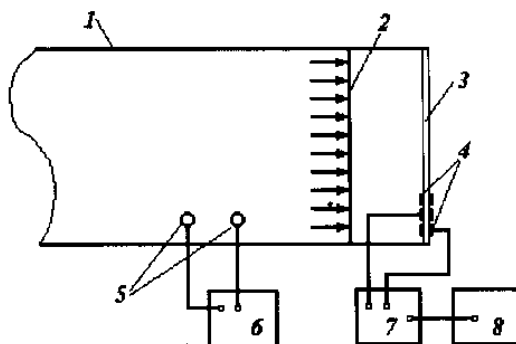


Рис. 1

L – 1250; 8 – компьютер.

Испытанию подвергалась прямоугольная пластина из стеклотекстолита толщиной 2,8 мм, шириной $a = 139$ мм и длиной $b = 210$ мм. Плотность материала пластины $\rho = 1,7$ г/см³, модуль упругости $E = 2,6 \cdot 10^{10}$ Па. Пластина, жёстко закреплённая по двум коротким сторонам, имела краевой разрез, параллельный закреплённым сторонам, начиная от середины одной из свободных сторон. Ширина разреза – 0,5 мм, длина – 38 мм, что составляло примерно 0,27 короткой стороны пластины a .

Заготовка пластины имела размеры 350x139 мм, при этом она крепилась между двумя стальными рамками, толщиной 18 мм каждая. С помощью винтов с одновременной проклейкой поверхностей контакта пластины и рамок эпоксидным составом холодного отверждения пластина была жёстко закреплена по двум коротким сторонам. Внутренний размер рамок совпадал с размером поперечного сечения ударной трубы 210x140 мм, внешний – 300x230 мм. Зазоры между свободными краями пластины и внутренними сторонами рамок составляли примерно 0,5 мм.

С помощью болтов рамки вместе с пластиной крепили в конце измерительной секции диафрагменной ударной трубы (рис. 1), имеющей по всей длине (камера – канал – измерительная секция) одинаковое сечение прямоугольной формы. Соотношение длины камеры и канала было таким, что в результате прорыва диафрагмы в измерительной секции формировалась ударная волна ступенчатой формы длительностью $t \approx 8 \cdot 10^{-3}$ с. За указанный промежуток времени пластина совершала около двух полных колебаний.

Давление во фронте падающей ударной волны задано значением давления в камере в момент прорыва диафрагмы и определено через скорость фронта падающей волны. Скорость фронта в каждом опыте вычислена по значению отрезка времени, за который волна проходила фиксированное расстояние между двумя пьезоэлементами 5 (рис. 1), установленными в конце измерительной секции ударной трубы. Сигналы пьезоэлементов поступали на входы двухлучевого запоминающего осциллографа GDS – 806S. Относительная погрешность определения давления по указанной методике не превышала $\pm 4\%$.

Во всех сериях опытов пластина была подвергнута действию одинаковых по амплитуде волн, при которых давление, действующее на поверхность пластины, составляло $(0,12 \cdot 10^5 \pm 5\%)$ Па и соответствовало давлению в отраженной от пластины ударной волне.

На рис. 2 показана рабочая часть пластины с разрезом.

На пластину были наклеены тензорезисторы типа КФ5П1 – 1 – 200В – 12 и КФ4П1 – 3 – 100В – 12 с базой один и три миллиметра. При наклейке использован эпоксидный клей холодного отверждения, при этом датчики деформаций располагались по линиям, ориентированным вдоль свободных (ось x) и закреплённых (ось y) сторон. Начало координат было расположено в начале разреза (точка 0 , рис. 2). Каждой линии присваивался номер от I до VI, а также указано, на каком безразмерном расстоянии

1. Методика исследований.

Схема динамических испытаний показана на рис. 1, где 1 – измерительная секция, которая располагалась в конце канала диафрагменной ударной трубы; 2 – фронт ударной волны (стрелками показано направление её распространения); 3 – испытуемая пластина с тензорезисторами 4; 5 – пьезодатчики, фиксирующие на осциллографе 6 моменты времени прохождения фронтом волны указанных датчиков; 7 – устройство

$l = y/a$ от начала координат она находилась (рис. 2). Составляющие деформаций в направлении оси x регистрировали вдоль линий I – V, в направлении оси y – вдоль линии VI. Линии V и VI расположены симметрично с двух сторон оси y на минимально возможном (для указанного типа тензорезисторов) расстоянии от края разреза и далее от оси y . Вдоль всех линий датчики деформаций наклеивались на обе поверхности пластины друг под другом, что позволяло регистрировать изменение во времени деформаций на нагружаемой (ε_x^+ , ε_y^+) и свободной (ε_x^- , ε_y^-) поверхностях пластины. Определение изгибных и мембранных деформаций проведено по известным формулам, как полусумма и полуразность поверхностных деформаций.

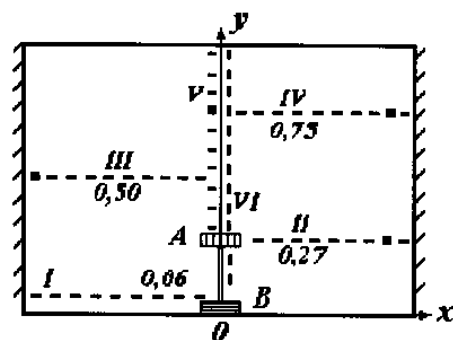


Рис. 2

Сигналы тензорезисторов регистрировались на экране персонального компьютера Pentium- S с помощью быстродействующего устройства ввода – вывода и обработки аналоговой и цифровой информации L1250. В каждом опыте фиксировали четыре сигнала деформаций на поверхностях пластины или изгибных (мембранных) деформаций, изменяющихся во времени в результате воздействия ударноволновой нагрузки на одну из поверхностей пластины.

Десятикратное повторение опытов при одних и тех же условиях показало, что значения деформаций определены с погрешностью $\pm 10\%$. Ошибка при измерении отрезка времени между первым и вторым максимумами (период колебаний T пластины) не превышала $\pm 7\%$.

Проведено четыре серии экспериментов. Первоначально произведены измерения деформаций вдоль линий I – VI на пластине с разрезом $L = 0,27$. Во второй серии опытов на кончик разреза эпоксидным составом холодного отверждения с двух сторон друг под другом наклеивали две накладки из стеклотекстолита (A , рис. 2). В направлении разреза накладки имели размер 5 мм, что составляло примерно 0,13 длины разреза; в направлении оси x – 20 мм, т. е. около 0,1 длины свободной стороны. Суммарная толщина пластины и обеих накладок составила 5,5 мм при толщине пластины 2,8 мм.

После проведения регистрации сигналов всех тензорезисторов накладка A была удалена и снова проведена регистрация деформаций вдоль линий I – VI (третья серия). Измерения показали, что пластина восстановила свои первоначальные свойства.

В четвертой серии опытов накладка того же размера крепилась с двух сторон в начале разреза (B , рис. 2) и снова регистрировали сигналы всех тензорезисторов.

2. Результаты исследований.

Рис. 3 иллюстрирует осциллограммы деформаций $\varepsilon_x(t)$, зарегистрированные тензорезисторами, отмеченными на рис. 2 черными квадратиками. Две первые зависимости зарегистрированы на свободной стороне пластины с разрезом без перемычек: 1 – в точке, лежащей на продолжении разреза: $x = 0$; $y = 0,62$ (линия V); 2 – в точке, лежащей на линии IV: $x = 0,44$; $y = 0,75$. Осциллограмма 3 зафиксирована тензорезистором, расположенным на поверхности пластины со стороны падения ударной волны. При этом перемычка находилась на кончике разреза (A), а координаты точки измерения на линии II имели значения: $x = 0,07$, $y = 0,27$. Осциллограмма 4 принадлежит тензодатчику, имеющему координаты $x = 0,48$; $y = 0,50$ (линия III) со свободной стороны пластины при наличии перемычки B в начале разреза.

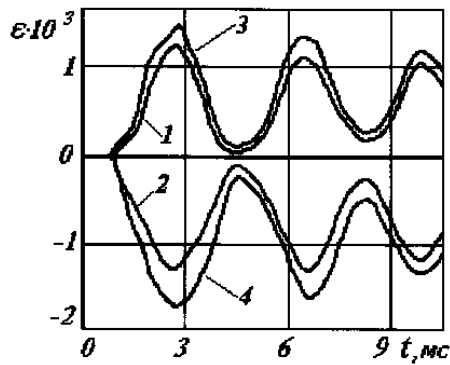


Рис. 3

Анализ осциллограмм показал, что все элементы исследуемой пластины с краевым разрезом, а также с разрезом, подкрепленным накладкой в кончике разреза или в его начале, в результате падения ударной волны ступенчатой формы совершали затухающие квазигармонические колебания. При этом колебания, как и в случае сплошных пластин [5] и пластин с центральным разрезом [7], происходили не относительно нулевого уровня, а относительно некоторого постоянного уровня, соответствующего значению давления при действии ступенчатой ударно-волновой нагрузки. При обработке осциллограмм проводили измерение интервала времени между двумя первыми максимумами. Условимся называть этот отрезок времени периодом колебаний T . С точностью до ошибки измерения ($\pm 7\%$) период колебаний T был одинаковым при испытаниях пластины с неподкрепленным разрезом, а также при подкреплении разреза накладкой в его кончике (A) или в начале разреза (B).

Поскольку исследуемая пластина симметрична относительно оси y , на графиках зависимостей деформаций от координаты x показаны деформации половины пластины от $x = 0$ до $x = 0,5$. Деформированное состояние пластины определено по осциллограммам в момент развития первого максимума.

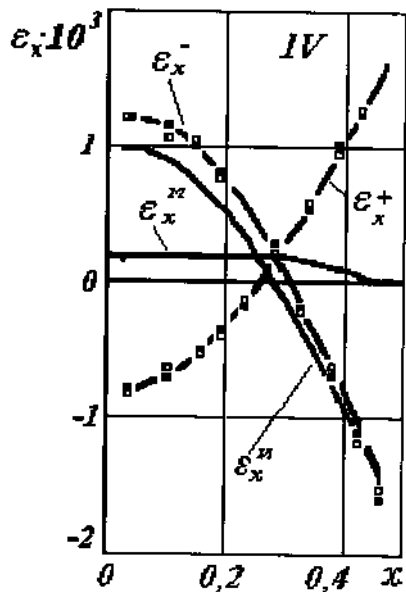


Рис. 4

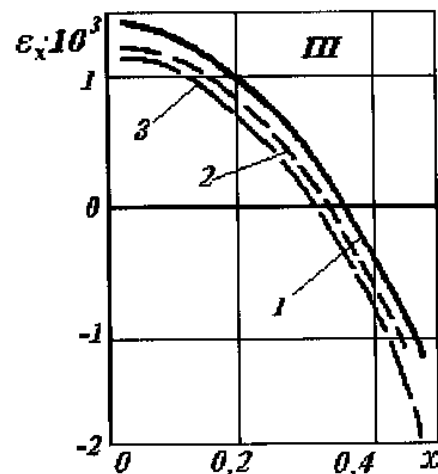


Рис. 5

Части пластины, удаленные от разреза, показали слабую реакцию на наличие или отсутствие накладок. На рис. 4 представлены эпюры деформаций ϵ_x как функции координаты x вдоль линии IV (рис. 2), со стороны падения волны ϵ_x^+ и со свободной стороны ϵ_x^- . Экспериментальные точки, обозначенные квадратами (накладка A) и зачерненными квадратами (накладка B), практически совпадают с кривыми, полу-

ченными при испытании пластины с разрезом без накладок. Сплошная кривая ε_x^u , характеризующая мембранные деформации срединной плоскости пластины, соответствует равномерному растяжению пластины, снижающемуся до нулевого значения вблизи защемления. На фоне почти равномерного растяжения пластина в средней части изгибалась в сторону действия нагрузки ($\varepsilon_x^u > 0$), а начиная от точки перегиба до защемления, – в противоположную сторону: $\varepsilon_x^u < 0$.

Линия III расположена в середине пластины ($y = 0,5$). На рис. 5 показаны эпюры деформаций поверхностных слоёв свободной стороны пластины для трёх вариантов: пластина с разрезом (сплошная кривая 1), накладка A в кончике разреза (линия 2, проведенная короткими штрихами), накладка B расположена в начале разреза (кривая 3, изображенная длинными штрихами). Наличие накладок приводит к уменьшению деформаций растяжения в центральной части пластины и к увеличению деформаций сжатия, начиная от точки перегиба до защемления.

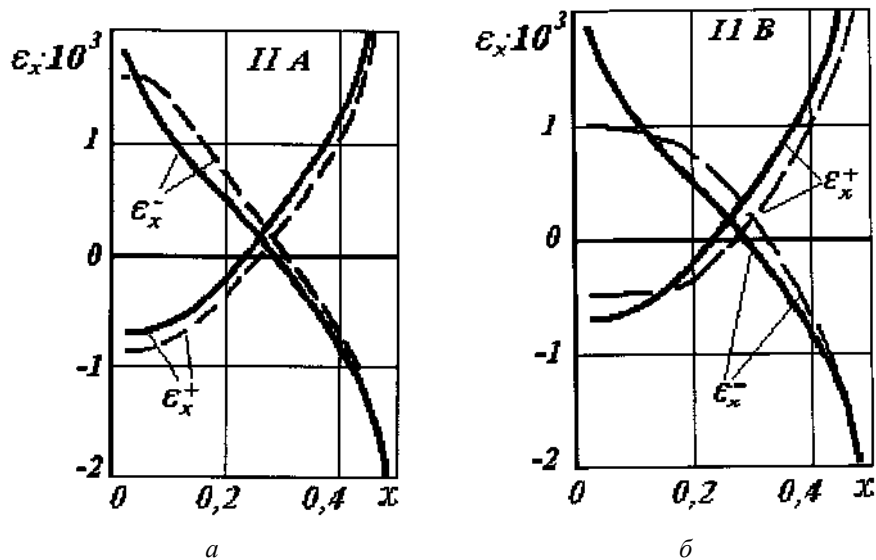


Рис. 6

Рис. 6 даёт возможность сравнить эпюры деформаций вдоль линии II с обеих сторон пластины в случае неподкрепленного разреза и разреза с накладками A на кончике (рис. 6, а) и B – в начале разреза (рис. 6, б).

Сплошными кривыми показаны зависимости ε_x^+ и ε_x^- от координаты x пластины с неподкрепленным разрезом, пунктирными – те же зависимости в случае с накладками. На линии II, находящейся на уровне кончика разреза, имело место существенное возрастание деформаций при приближении к нему как концентратору. Это заметно из самой эпюры, а также из сравнения соответствующих кривых на линии IV (рис. 4), значения которой не зависят от наличия накладок. Оба варианта накладок A и B изменяли показания датчиков, в основном, в области выпучивания от одной точки перегиба до другой.

Накладка на кончике разреза влекла за собой возрастание деформаций как со стороны падения ударной волны, так и со свободной стороны, и лишь вблизи кончика наблюдалось небольшое снижение деформаций.

Накладка B оказывала более существенное влияние на деформации элементов пластины, находящихся на линии II, приводя к существенному снижению их значений в области малых значений x и к небольшому уменьшению, начиная от точки перегиба до защемления (рис. 6, б).

Тензорезисторы линии *I* были расположены вблизи края свободной стороны пластины (рис. 2). На рис. 7 линия *I* – максимальные деформации свободной стороны пластины с разрезом, без накладок; сплошная кривая *2* характеризует влияние накладки *B* на значения деформаций в тот же момент времени.

Для сравнения приведена кривая *3*, обозначенная точками – эпюра деформаций линии *IV*, нечувствительной к наличию накладок. Наличие накладки в начале разреза приводило к существенному перераспределению деформаций вдоль свободной стороны пластины: при малых значениях *x* наблюдалось многократное возрастание деформаций, с ростом координаты *x*, в зоне сжатия, деформации уменьшались, а точки изменения знака деформаций смещались в сторону защемления.

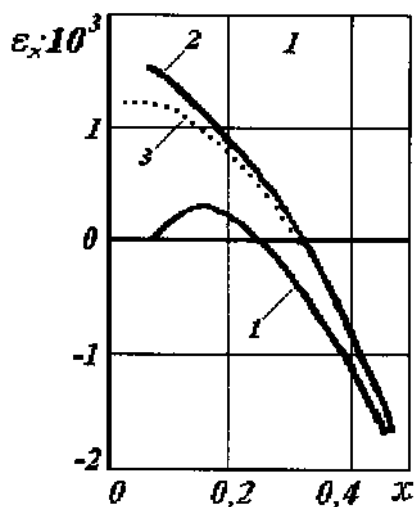


Рис. 7

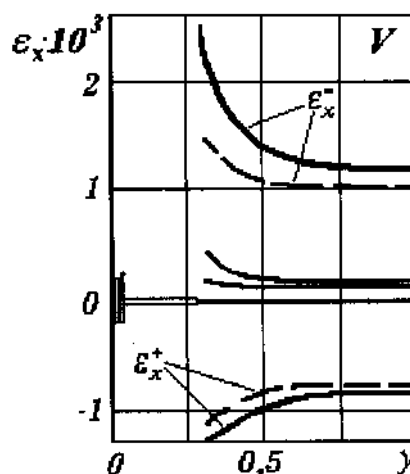


Рис. 8

Графики рис. 8 – зависимости деформаций ϵ_x с двух сторон пластины на линии *V*, являющейся продолжением разреза. Сплошными кривыми показаны результаты измерений деформаций пластины с разрезом без накладок, пунктирными – с разрезом, укрепленным накладкой *B* (показана на рисунке в начале оси *y*). Тонкими сплошными линиями обозначены деформации растяжения срединной линии пластины без накладки (верхняя линия) и пластины с накладкой *B* (нижняя кривая).

Видно, что наличие накладки *B* приводит к значительному снижению деформаций поверхностных слоев пластины вблизи кончика разреза, а также к уменьшению деформаций, принимающих стабильное значение по мере возрастания значения координаты *y*. Наблюдалось также снижение мембранных деформаций, начиная от кончика разреза до свободной стороны (*y* = 1).

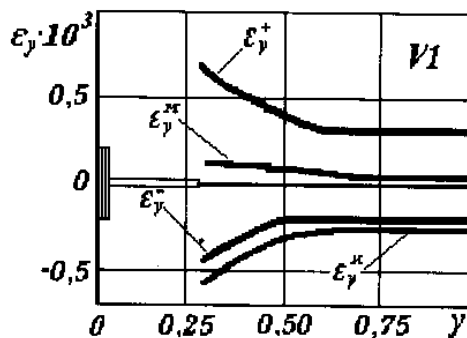


Рис. 9

При деформировании пластины в направлении оси x имела место изменение деформации в направлении оси y .

Результаты измерения составляющей ε_y как функции координаты y на линии VI показаны на рис. 9 при наличии накладки в начале разреза. Здесь ε_y^+ , ε_y^- – максимальные деформации с двух сторон пластины; ε_y^m , ε_y'' – мембранные и изгибные деформации в этот же момент времени, соответственно.

Не приводя на графике данных для пластины без накладок, отметим, что они отличались от приведенных, начиная от кончика разреза ($y = 0,27$) до значения $y \approx 0,6$ не более, чем на 15%.

В этом же диапазоне значений y наблюдалось почти двукратное увеличение деформаций изгиба ε_y'' и растяжения ε_y^m по сравнению с их стабильными значениями при $y > 0,6$.

Выводы.

Экспериментально исследовано влияние двух вариантов накладок на деформирование упругой пластины с краевым разрезом при нормальном падении на одну из ее поверхностей плоской ударной волны ступенчатой формы.

Установлено, что накладка малого размера на кончике разреза или в его начале при длине разреза, примерно равном четверти характерного размера пластины, практически не влияет на процесс колебания пластины, а следовательно, и на период её колебаний.

На линии, являющейся продолжением разреза, влияние накладок на значения деформаций более всего имело место в области, близкой к кончику разреза и постепенно уменьшаясь становилось незаметным на расстоянии, примерно равном двум длинам разреза, начиная от его кончика.

Из двух вариантов накладок более существенное влияние на деформированное состояние пластины с разрезом оказывала накладка, расположенная в начале разреза. При этом примерно вдвое уменьшалось значение деформаций растяжения в области кончика разреза при одновременном их существенном возрастании вдоль свободной стороны, где начинался разрез.

Отметим, что полученные результаты могут быть использованы как для оценки достоверности расчетов, так и для теоретического анализа наиболее рационального подкрепления элементов конструкций, имеющих дефект типа трещин.

РЕЗЮМЕ. Экспериментально досліджено поведінку тонкої пружної пластини з краєвим розрізом як з накладкою у кінчику розрізу, так і у його початку при дії слабкої ударної хвилі у повітрі. Показано вплив накладок на процес деформування.

1. Албаут Г.Н., Митасов В.М., Пичкурова Н.С., Табанюхова М.В. – Модельное исследование влияния организованных трещин на напряженное состояние балок // Изв. вузов. Строительство. – 2009. – № 6. – С. 119 – 127.
2. Землянова А.Ю., Сильвестров В.В. Подкрепление пластины с круговым вырезом эксцентрической круглой накладкой // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2008. – № 1. – С. 73 – 86.
3. Москаленко Л.В. Колебания пластин с вырезами и трещиной // МГТУ ГА – 2005. – № 85. – С. 21 – 26.
4. Anik'ev, Mikhailova M.I., Sushchenko E.A. Deformation of an Elastic Plate with an Edge Notch under Action of a Plane Shock Wave: Experimental Research // Int. Appl. Mech. – 2009. – 45, N11. – P. 1243 – 1247.
5. Badzagua I. Research mode of deformation of thin depressed shells with elliptical holes // Probl. Mech. – 2012. – N 3. – P. 60 – 64, 66, 69.

6. *Bonde D.N., Rao K. P.* Thermal Stresses in a Cylindrical Shell Containing Circular Hole or a Rigid Inclusion // Nuclear Engineering and Design. – 1977. – **47**, N 4. – P. 441 – 448.
7. *Huang C.S., Leissa A.W., Liao S.C.* Vibration analysis of rectangular plates with edge V – notches // Int. J. Mech. Sci. – 2008. – **50**, N 8. – 1255 – 1262.
8. *Kostandov Yu. A., Makarov P.V., Eremin M.O., Smolin I.Yu., Shipovskii I.E.* Fracture of compressed Brittle Bodies with a Crack // Int. Appl. Mech. – 2013. – **49**, N1. – P. 113 – 121.
9. *Kumar D., Singh S.B.* Stability and failure of composite laminates with various shaped cutouts under combined in-plane loads // Composites. B. – 2012. – **43**, N 2. – P. 142 – 149.
10. *Liu H., Zhao X.L., Al-Mahaidi R.* Boundary element analysis of CFRP – reinforced steel plates // Compos. Struct. – 2009. – **91**, N 1. – P. 74 – 85.
11. *Maksimyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S.* Nonlinear Deformation of Thin Isotropic and Orthotropic Shells of Revolution with Reinforced Holes and Rigid Inclusion // Int. Appl. Mech. – 2013. – **49**, N 6. – P. 685 – 692.
12. *Mhamdia R., Serier B., Bouiadjra B. B., Belhouari M.* Numerical analysis of the patch effects on the performances of bonded composite repair in aircraft structures // Composites. B. – 2012. – **43**, N 2. – P. 391 – 397.
13. *Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S., Rudenko I.B.* Elastoplastic State of Spherical Shells with Cyclically Symmetric Circular Holes // Int. Appl. Mech. – 2012. – **48**, N 5. – P. 573 – 582.
14. *Zhang H.H., Rong G., Li L.X.* Numerical study on deformations in a cracked viscoelastic body with the extended finite element method // Eng. Anal. Boundary Elem. – 2010. – **34**, N 6. – P. 619 – 624.
15. *Useche J.F., Sollero H., Albuquerque E.L.* Boundary element analysis of cracked sheets repaired with bonded anisotropic patches // Key Eng. Mater. – 2008. – N 383. – P. 97 – 108.

Поступила 24.12.2010

Утверждена в печать 26.06.2013

