

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

### НЕСТАЦИОНАРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНСОЛЬ – СТЕРЖЕНЬ ПРИ НАГРУЗКАХ, БЛИЗКИХ К КРИТИЧЕСКИМ

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

**Abstract.** The results of experimental study of process of deforming the coupled elastic system consisting of a console plate and a rod, which supports the console, are presented. The long plane shock wave of acoustical range incidences on the plate, what results in the large deformations. The critical value of shock-wave load is found, which leads to stability loss of the rod foundation. The registration of nonstationary deformations is carried out with use of PC and high-precision portative 8-canal device LMS SCSDAS Mobile (Belgium).

**Key words:** experimental study, console plate, supporting rod, plane shock wave, large deformations.

#### **Введение.**

Теоретические и экспериментальные исследования динамического поведения сложных конструкций позволяют разработать методики выявления дефектов [13], измерения массы и веса [21], формирования металлических изделий [15], прогнозирования нагрузки потери устойчивости [6], создания микромеханических систем [7, 8] и другое.

Модели нелинейного динамического деформирования толстой балки предложены в [10], в которых деформации по толщине изменяются пропорционально квадрату первой производной от прогиба. Такие деформации не могут быть проигнорированы, если балка подвергается изгибу средней величины.

Конечноэлементная модель разрушения вязкопластических тонкостенных оболочечных конструкций предложена в [16]. В качестве примеров рассмотрены пластины под ударно-волновой нагрузкой.

Численное моделирование и экспериментальное исследование поведения пластин под действием импульсных нагрузок, проведено в [19]. Кинематическая гипотеза теории включала деформации поперечного сдвига, инерцию вращения, геометрически нелинейные эффекты. Эксперименты выполнены в ударной трубе.

Методике исследования конструкций с помощью ударной трубы [9, 12] посвящен ряд публикаций [6, 15, 18]. В экспериментальных работах [11, 17, 20] применена аппаратура LMS SCADAS Mobile.

Таким образом, в ряде работ исследуются изолированные стержни или пластины, а исследованию сочлененных элементов конструкций посвящены, в основном, работы [1 – 3, 6, 14].

Поведению элементов конструкций в упругой области, предшествующему моменту потери устойчивости, изучению их напряженно-деформированного состояния в процессе взаимодействия с нестационарными нагрузками посвящено небольшое количество экспериментальных работ. Как правило, исследования выполнены с помощью методики, не имеющей стандартного (лицензионного) приборного обеспечения [1 – 4, 6, 14].

В настоящее время Институт механики им. С.П. Тимошенко имеет широкополосную восьмиканальную тензостанцию LMS SCADAS Mobile (Бельгия). Указанная аппаратура – универсальный мобильный анализатор, совместимый с различным типом датчиков: тензорезисторами, акселерометрами, микрофонами и т. д. Общий динамический диапазон – 178 дБ; измерение амплитуды – с погрешностью, не более 0,2%; частота опроса – 204,8 кГц. Регистрация и визуализация сигналов на экране компьютера происходит в режиме реального времени при динамическом и квазистатическом нагружении. Возможно определение резонансных частот. Высокая помехозащищённость от электронаводок даёт возможность точного определения сигнала в заданный момент времени.

Настоящее исследование является продолжением работы [4] и посвящено воздействию на систему консоль – «низкочастотный» стержень более высоких ударно - волновых нагрузок, при которых деформации элементов системы превышают значение  $3000 \mu\text{S}$  (микрострейн,  $1 \mu\text{S} = 10^{-6}$ ). При этом падающие на консоль ударные волны создают условия, близкие к критической нагрузке опорного стержня.

### **1. Постановка задачи. Экспериментальная установка.**

Различные типы ударных труб, сконструированных для генерации ударных волн с контролируемыми параметрами в лабораторных условиях, широко используются в экспериментах, моделирующих взрывной процесс [9, 12]. В данной работе для создания ударных волн различной интенсивности использована диафрагменная ударная труба.

Основные параметры нагружающего устройства приведены в [2 – 4]. Укажем здесь лишь геометрические размеры связанной системы консоль – стержень, изготовленной из стеклотекстолита (модуль упругости  $E = 2,6 \cdot 10^{10}$  Па; плотность материала  $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$ ). Консоль имела размеры  $105 \times 61 \times 2,5$  мм; стержень –  $136 \times 10 \times 1,5$  мм.

Одна короткая сторона консоли жёстко закреплена между стальными толстыми рамками. Две длинные стороны – свободны. К четвёртой стороне через подпятник был прикреплен один конец опорного стержня, другой конец которого жёстко закреплён в массивной неподвижной опоре.

Консоль при ударном возбуждении показала собственную частоту 525 Гц (42 дБ); стержень – первую собственную частоту 290 Гц (40,4 дБ), а также 1080 Гц (33,8 дБ). Значения частот определены с погрешностью  $\pm 5$  Гц.

Во всех опытах использованы тензорезисторы типа КФ 5П1-3-120-Б-12 базой 3 мм и сопротивлением 120 Ом.

Характеристика экспериментальной установки, а также способ определения параметров падающей ударной волны и волны нагрузки при отражении от плоской преграды, приведены в [2 – 4, 6, 14].

### **2. Результаты исследования и их анализ.**

В работе [4] максимальные деформации элементов системы не превышали  $0,3 \cdot 10^{-3}$ , при этом ударно-волновая нагрузка на консоль не превышала  $0,37 \cdot 10^5$  Па. Начиная с волновых нагрузок  $P \approx 0,4 \cdot 10^5$  Па и выше, в некоторых элементах системы имели место деформации, превышающие  $0,3 \cdot 10^{-3}$ , а в поведении системы появились качественные изменения.

На рис. 1, 2, а показаны типичные для нагрузок, превышающих  $0,4 \cdot 10^5$  Па, осциллограммы, зарегистрированные в одном из опытов с внезапно приложенной нагрузкой на консоль  $0,45 \cdot 10^5$  Па. Сплошными вертикальной и горизонтальной прямыми, пересекающимися в центре маленького квадрата, показаны курсоры, которые в процессе обработки и измерений дают возможность зафиксировать значение деформаций каждого тензорезистора с высокой точностью в любой заданный момент времени.

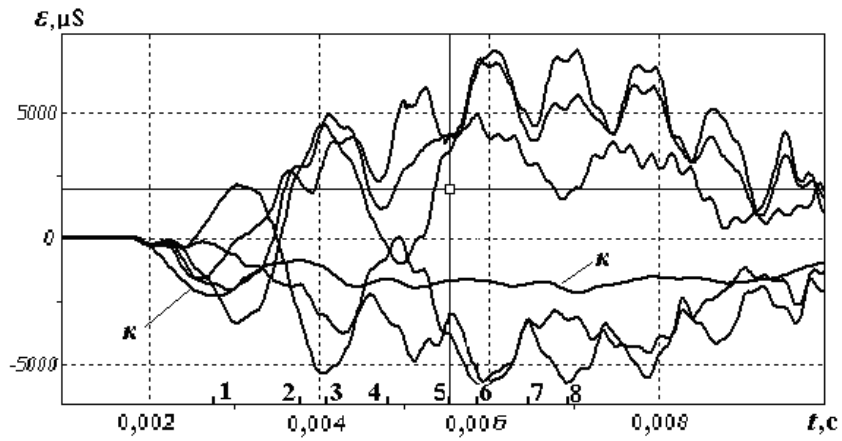
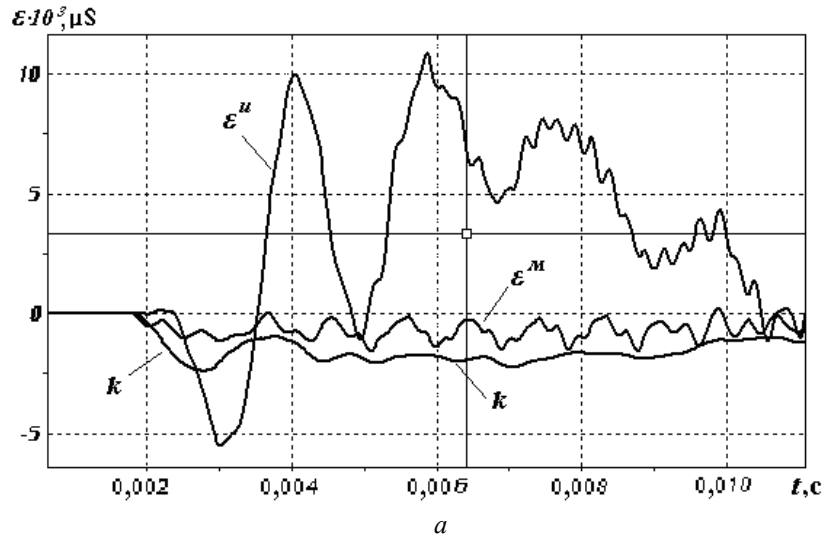
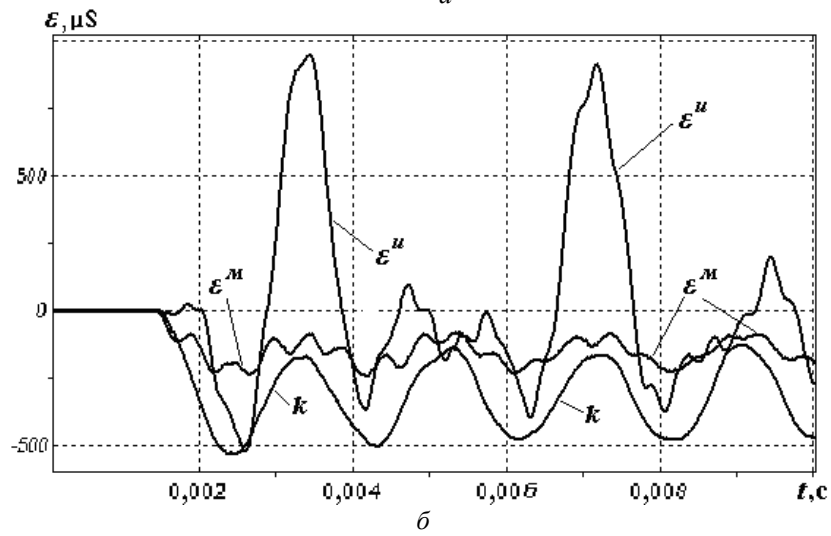


Рис. 1

В отличие от [4], на рис. 1 деформации превышают 6000  $\mu S$ , а на рис 2, а изгибные деформации  $\varepsilon^u$  имеют значения, превышающие 10 000  $\mu S$ .



а



б

Рис. 2

Для сравнения на рис. 2, б приведены такие же осциллограммы при действии на консоль нагрузки  $P = 0,12 \cdot 10^5$  Па, когда деформации стержневой опоры не превышали  $1000 \mu S$ .

Отметим некоторые особенности процесса деформирования данной системы в сравнении с её поведением при низких нагрузках. В [4] показано, что при низких нагрузках в продолжении всего времени действия ударной волны консоль колеблется около постоянного уровня с небольшими изменениями амплитуды, значение которой могло превышать в 1,3 – 1,5 раз постоянный уровень деформаций, обусловленный амплитудой нагрузки в ступенчатой ударной волне. Частота колебаний консоли равнялась её первой собственной частоте ( $\approx 500$  Гц).

При более высоких нагрузках консоль также колебалась около постоянного уровня, зависящего от амплитуды падающей ударной волны. Её отклонение в течение первого периода составляло  $\approx 0,4$  от уровня постоянного значения, в последующем не превышавшая значения 0,1. Консоль как бы была прижата постоянно действующей нагрузкой и слабо колебалась около нового уровня. Это свидетельствует о том, что при действии нагрузок, превышающих  $0,4 \cdot 10^5$  Па, деформации консоли после одного периода колебаний остаются почти на одинаковом уровне, слабо отклоняясь от среднего значения.

Заметно отличие и в осциллограммах  $\varepsilon''$ , характеризующих закон осевого нагружения опорного стержня. При слабых деформациях стержня его осевая нагрузка содержала постоянную составляющую и две квазигармонические с частотой колебаний консоли  $f_1 \approx 500$  Гц и частотой  $f_2 \approx 2$  кГц. При сильных нагрузках, близких к прогнозируемой критической нагрузке стержня,  $\varepsilon''$  наряду с постоянной содержала квазигармонические составляющие с более высокими частотами  $f_1 \approx 1$  кГц и  $f_2 \approx 4$  кГц.

Для контроля целостности испытуемой системы и тензорезисторов время от времени были проведены контрольные опыты при действии на систему слабой нагрузки. Результаты опытов были сопоставлены с результатами начальных опытов при действии такой же ударной волны. Совпадение осциллограмм указывало на сохранность системы вместе с датчиками деформации и являлось основанием для дальнейших испытаний.

На рис. 3 прямые линии являются повторением измерений [5]; на этом же рисунке показаны результаты измерения максимальных деформаций консольного тензорезистора, расположенного вблизи защемления (пунктирная кривая); при этом точками обозначены данные опытов при деформациях стержневой опоры, превышающих значение  $3000 \mu S$ . При действии

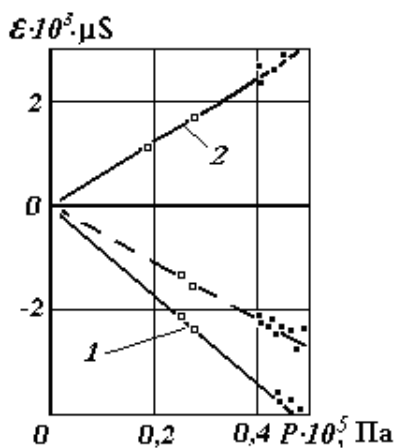


Рис. 3

таких же нагрузок показаны зависимости деформаций стержня в двух точках: 1 – на безразмерном расстоянии 0,05; 2 – 0,42 от жёсткого защемления. Квадратиками обозначены результаты контрольных опытов, проведенных при нестационарных нагрузках на консоль  $(0,25 - 0,28) \cdot 10^5$  Па после проведения испытаний при  $P \approx 0,49 \cdot 10^5$  Па.

Приведенные зависимости позволяют сформулировать два вывода: 1 – в пределах разброса ( $\pm 10\%$ ) испытуемая система даже при нагрузках, приводящих к деформациям порядка нескольких тысяч микрострейн, ведет себя как линейная система; 2 – при таких больших деформациях свойства системы вместе с тензорезисторами остались такими же, как были первоначально.

Заметны и качественные изменения в процессе деформирования стержневой опоры (рис. 1): у стержня появились более низкие частоты колебаний. Поскольку за время действия нагрузки не наблюдалось нескольких периодов колебаний стержня, невозможно было воспользоваться операцией быстрого преобразования Фурье. Определение частот колебаний происходило через измерение интервала времени, равного периоду колебаний непосредственно на экране ПК.

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость квадрата низшей частоты колебаний стержня в зависимости от ударно-волновой нагрузки, действующей на поверхность консоли. Прямая линия на рис. 4 показывает, что в соответствии с теоретической зависимостью, приведенной, например, в [5], низшая частота колебаний стержня стремится к нулю по мере приближения осевой нагрузки стержня к критической. Линейная зависимость  $\Omega^2 = f(P)$  может быть использована в неразрушающих способах определения критической нагрузки [6]. Для этого следует при нескольких значениях осевой нагрузки определить значение низших частот колебаний стержня. Полученные данные нанести на график с координатами  $\Omega^2$  и  $P$  и по экспериментальным точкам провести прямую. Прямую продолжить до пересечения с осью  $P$  и в точке пересечения определить критическую нагрузку.

Зависимость  $\Omega^2 = f(P)$  (рис. 4) прогнозирует, что в испытываемой системе консоль – стержень стержневая опора потеряет устойчивость при ударно-волновой нагрузке на консоль, равной  $\approx 0,5 \cdot 10^5$  Па.

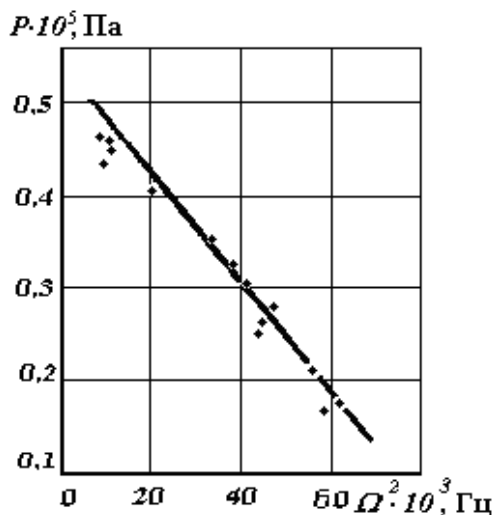


Рис. 4

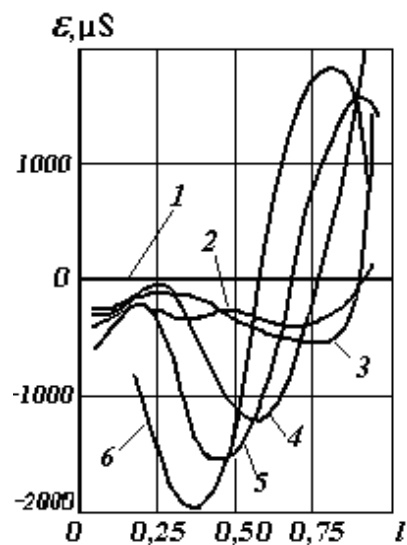


Рис. 5

Изменение формы стержня от начала падения ударной волны на консоль можно проследить по эпюрам деформаций в различные моменты времени. Рис. 5 и 6, где по оси абсцисс отложено значение безразмерной длины стержня  $l$ , дают возможность представить, как трансформируются эпюры деформаций стержня от начала соприкосновения фронта волны с поверхностью консоли. Поскольку во всех опытах среднее значение мембранных деформаций не превышало 10% значения максимальных изгибных деформаций, двойное интегрирование которых показывает форму изогнутой оси стержня, можно соотносить форму приведенных эпюр деформаций с формой изогнутой оси стержневой опоры.

На рис. 5 показаны эпюры деформаций стержня от начала соприкосновения фронта волны с поверхностью консоли (нулевая горизонтальная линия) до момента, отмеченного на рис. 1 цифрой 1, когда консоль испытывает максимальный прогиб под действием волны. Значения деформаций всех тензорезисторов при одинаковой амплитуде действующей на консоль нагрузки ( $P = 0,45 \cdot 10^5$  Па) измерены на экране ПК по осциллограммам, подобным рис. 1.

Вначале определялся отрезок времени  $T/2$  от начала взаимодействия системы с ударной волной до момента наибольшего значения деформации тензорезистора консоли ( $T/2$  было одинаковым для всех уровней нагружения). Значение  $T/2$  было разделено на пять и равнялось  $\Delta\tau = 0,19 \cdot 10^{-3}$  с. Курсор устанавливали на заданный момент

времени (с погрешностью  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  с) и фиксировали значение деформаций на каждом канале регистрации.

Сравнение с подобным графиком при малых нагрузках [4] показывает качественное совпадение процессов в указанный временной промежуток с учётом более высоких значений деформаций из-за действия более высоких давлений.

На рис. 6, а, б представлены эпюры деформаций стержня в моменты, когда консоль находится в экстремальных точках деформирования (на рис. 1 соответствующие моменты времени обозначены цифрами 1 – 8). Такими же цифрами на рис. 6 обозначены эпюры деформаций стержня, соответствующие указанным моментам времени. (Кривая 1 на рис. 6, а является повторением эпюры деформаций б (рис. 5), поскольку относится к одному и тому же моменту времени).

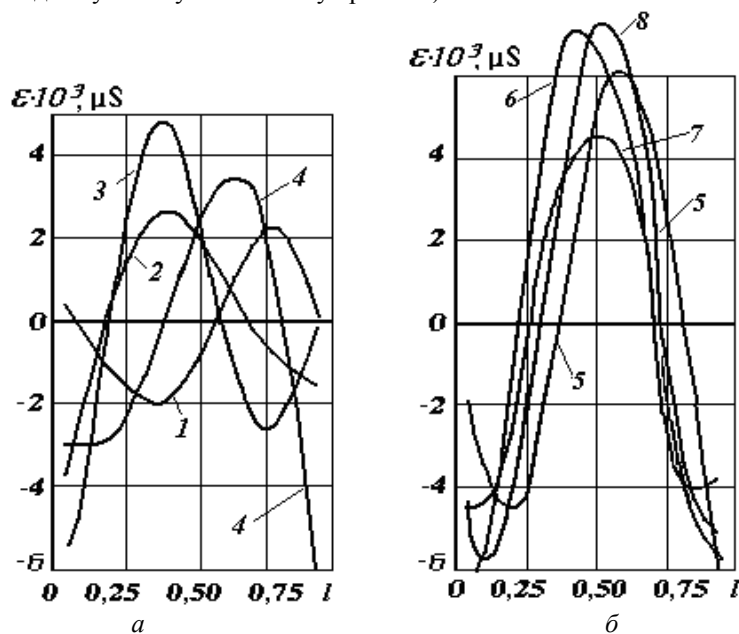


Рис. 6

Дальнейший процесс деформирования стержневой опоры можно проследить по эпюрам деформаций, приведенным на рис. 6, а, б. До момента 4 стержень изгибается то в одну, то в другую сторону. Затем наблюдается значительное возрастание деформаций, а соответственно, и прогибов стержня (рис. 6, б). При этом стержень, в отличие от моментов 1 – 4, остается прогнутым только в одну сторону.

#### Заключение.

Таким образом, с помощью высокоточной портативной восьмиканальной аппаратуры LMS SCADAS Mobile (Бельгия) экспериментально исследовано поведение упругой связанной системы, состоящей из консоли и прикреплённого к ней «низкочастотного» стержня при падении плоской ударной волны на консоль, приводящей к деформациям, превышающим  $3000 \mu S$ . Показано, что оба элемента системы в начальный период времени ведут себя линейно при возрастании нагрузки на консоль. Дан прогноз значения критической ударно-волновой нагрузки стержневой опоры. Консоль под действием ударно-волновой нагрузки совершала колебание в течение лишь одного периода, в дальнейшем оставаясь отклонённой почти на одном уровне. Стержневая опора испытывала осевое сжатие, состоящее из постоянной и двух квазигармонических составляющих, при этом уровень максимальных изгибных деформаций примерно в 10 раз превышал среднее значение мембранных деформаций. Стержень колебался, многократно изменяя свою форму в процессе колебаний. При этом наибольшие деформации развивались вблизи защемления, а также в средней части стержня.

Отметим, что полученные результаты могут быть использованы как при постановке задач, так и в качестве критерия достоверности при теоретическом анализе поведения связанных элементов упругих конструкций под действием ударных волн.

РЕЗЮМЕ. Наведено результати експериментального дослідження процесу деформування зв'язаної пружної системи, що складається з консольної пластини і підкріплюючого її стержня, при падінні на консольну пластину довгої плоскої ударної хвилі, що приводить до великих деформацій. Надано прогноз значення критичного ударно - хвильового навантаження, яке приводить до втрати стійкості стержневої опори. Реєстрацію нестационарних деформацій проведено на персональному комп'ютері з використанням високоточної портативної восьмиканальної апаратури LMS SCADAS Mobile (Бельгія).

1. Аникъев И.И., Голованенко С.Н., Михайлова М.И., Списовский А.С., Суценко А.Е., Тимофеев А.Л. Авторское свидетельство №1345785 (СССР), 1987.
2. Аникъев И.И., Михайлова М. И., Списовский А. С., Суценко Е. А. Динамический отклик системы балка – стержень на воздействие ступенчатой нагрузки // Прикл. механика. – 1987. – **23**, № 5. – С. 87 – 94.
3. Аникъев И.И., Михайлова М. И., Списовский А. С., Суценко Е. А. Нестационарное деформирование системы балка – стержень при действии ударной волны // VI Всесоюз. съезд по теор. и прикл. механике: Аннот. докл. – Ташкент, 1986. – С. 42.
4. Аникъев И.И., Михайлова М.И., Суценко Е.А. Реакция упругой системы «консольная пластина – стержень» на действие ударной волны // Прикл. механика. – 2012. – **48**, N 6. – С. 135 – 141.
5. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
6. Гузь А.Н., Заруцкий В.А. и др. Экспериментальные исследования тонкостенных конструкций. – К: Наук. думка, 1984. – 240 с.
7. Buchaillet L., Millet O., Quevy E., Collard D. Post-buckling dynamic behaviour of self-assembled 3D microstructures // Microsyst. Technol. – 2007. – **14**. – P. 69 – 78.
8. Dinh T. X., Ogami Y. Design and simulation of MEMS-based dual-axis fluidic angular velocity sensor // Sensors and Actuators A 189. – 2013. – P. 61 – 66.
9. Fomin N.A. 110 years of experiments on shock tubes // J. Engng. Physics and Thermophysics. – 2010. – **83**, N 6. – P. 1118 – 1135.
10. Gao D.G. Finite deformation beam models and triality theory in dynamical post-buckling analysis // Int. J. Non-Linear Mechanics. – 2000. – **35**. – P. 103 – 131.
11. Guades E., Aravinthan T., Manalo A., Islam M. Experimental investigation on the behaviour of square FRP composite tubes under repeated axial impact // Composite Structures. – 2013. – **97**. – P. 211 – 221.
12. Krehl P.O.K. History of Shock Waves, Explosions and Impact: A Chronological and Biographical Reference. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 1310 p.
13. Lu Z. R., Law S.S. Features of dynamic respons sensitivity and its application in damage detection // J. Sound and Vibr. – 2007. – **303**, N 1 – 2. – P. 305 – 329.
14. Mikhailova M.I. Problems on Nonstationary Interaction of Structural Elements with Shock Waves // Int. Appl. Mech. – 2001. – **37**, N10. – P. 1237 – 1254.
15. Nagaraja S.R., Prasad J.K., Jagadeesh G. Theoretical-experimental study of shock wave-assisted metal forming process using a diaphragmless shock tube // Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering. – 2012. – **226**. – P. 1534 – 1543.
16. Nguyen A.D., Stoffel M., Weichert D. A gradient-enhanced damage approach for viscoplastic thin-shell structures subjected to shock waves // Comput. Methods Appl. Mech. Engng. – 2012. – **217** – **220**. – P. 236 – 246.
17. Skalski P. Testing of a composite blade // Acta Mechanica et Automatica. – 2011. – **5**, N4. – P. 101 – 104.
18. Stoffel M. A Measurement Technique for Shock Wave-Loaded Structures and Its Applications // Experimental Mechanics. – 2006. – **46**. – P. 47 – 55.
19. Stoffel M., Schmidt R., Weichert D. Shock wave-loaded plates // Int. J. Solids and Struct. – 2001. – **38**. – P. 7659 – 7680.
20. Tiseo B., Concilio A., Ameduri S., Gianvito A. A shape memory alloys based tuneable dynamic vibration absorber for vibration tonal control // J. Theoret. and Appl. Mech. – 2010. – **48**, N 1. – P. 135 – 153.
21. Toshitaka U., Tomoharu D. Nihon kikai gakkai ronbunshu // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. – 2008. – **74**, N 738. – P. 278 – 284.

Поступила 22.11.2010

Утверждена в печать 06.06.2013