

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

**РЕАКЦИЯ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ КОНСОЛЬ – СТЕРЖЕНЬ НА ДЕЙСТВИЕ
КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗОК**

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

Abstract. A process of deformation of elastic system “console – rod” is experimentally studied under action of a shock wave on a surface of console and under quasi-static loading the console. Registration of quasi-static and non-stationary strains is carried out by PC with use of the high-precision portative eight-canal apparatus LMS SCADAS Mobile (Belgium). It is revealed that in the case of theoretical analysis of analogous problems the nonlinear statement is necessary.

Key words: console, supporting rod, experimental study, quasistatic loading, plane shock wave, buckling load.

Введение.

Авиация, судостроение, строительство современных инженерных сооружений и другие отрасли народного хозяйства ставят в ряд актуальных задач исследование взаимодействия конструкций с нестационарными волновыми нагрузками. Основное требование к решению таких задач – прогнозировать поведение конструкции в любой момент её взаимодействия с волной, другими словами, – описать её напряженно-деформированное состояние как физический процесс во времени. Для подобных процессов труден выбор физической модели, а также математическая постановка задачи, поскольку в уравнениях появляется дополнительная переменная – время. Теоретическое описание подобных процессов особенно сложно в случае расчёта многоэлементных конструкций [3].

В инженерных расчётах принято, вводя коэффициент динамичности, отождествлять статическое и динамическое состояния конструкции. Такой подход существенно упрощает математическую постановку задач, однако полученные результаты требуют экспериментальной проверки [1].

Сопоставление квазистатического и динамического поведения сложных конструкций позволяет усовершенствовать некоторые технологические процессы соединения их элементов путем клёпки [9] или сварки [10], при этом, в основном, рассмотрены элементы тонкостенных конструкций [9, 12]. Динамическое деформирование консоли, связанной с демпфирующим элементом, исследовано в [13].

Целью данного сообщения является сопоставление экспериментальных результатов квазистатических и ударно-волновых испытаний связанной системы [4, 6, 7] консоль – низкочастотный стержень.

1. Постановка задачи. Методика исследования.

Различные типы ударных труб, сконструированных для генерации ударных волн с контролируемыми параметрами в лабораторных условиях, широко используются в экспериментах, моделирующих взрывной процесс [6, 11]. В данной работе для создания ударных волн различной интенсивности использована диафрагменная ударная труба.

Основные параметры нагружающего устройства приведены в [2 – 5]. Укажем здесь лишь геометрические размеры связанной системы консоль – стержень, изготовленной из стеклотекстолита (модуль упругости $E = 2,6 \cdot 10^{10}$ Па; плотность материала $\rho = 1,7$ г/см³). Консоль имела размеры 105×61×2,5 мм; стержень – 136×10×1,5 мм. Одна короткая сторона консоли была жёстко закреплена между стальными толстыми рамками. Две длинные стороны были свободными. К четвёртой стороне через подпятник был прикреплён 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 были определены с погрешностью ± 5 Гц. Во всех опытах использованы тензорезисторы типа КФ 5П1-3-120-Б-12 базой 3 мм и сопротивлением 120 Ом.

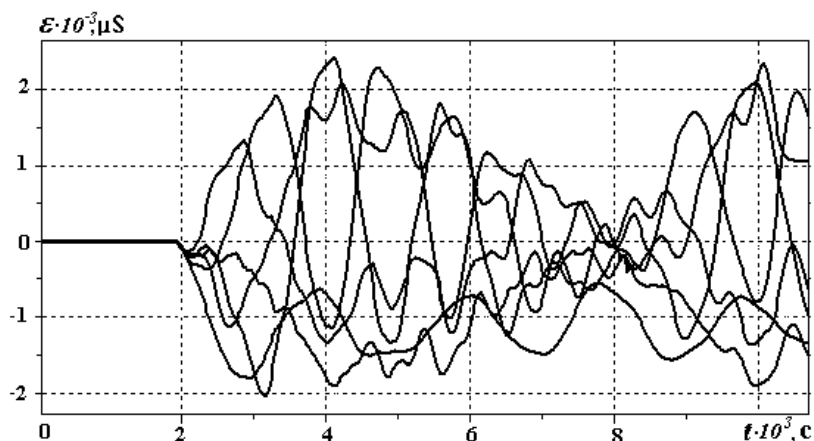


Рис. 1

Характеристика экспериментальной установки, а также способ определения параметров падающей ударной волны и волны нагрузки при отражении от плоской преграды, приведены в [2 – 5]. Ударно-волновая нагрузка определена через измерение температуры в измерительной секции непосредственно после регистрации деформаций, скорости падающей ударной волны, а также закона формирования нагрузки при воздействии волны на плоский объект [4].

Запись на экране ПК изменения деформаций во времени в результате действия на систему ударно-волновой нагрузки амплитудой $0,35 \cdot 10^5$ Па показана на рис. 1. Общее время регистрации составило примерно 0,01 с.

При проведении квазистатических испытаний измерительная секция вместе с прикреплённой к ней системой консоль – стержень превращалась в автономное устройство (рис. 2, где 1 – консоль, одна сторона которой закреплена между металлическими рамками 5; 2 – стержень, присоединённый к консоли через подпятник 3 (второй конец стержня жёстко закреплён в неподвижной опоре 4); 6 – массивные стойки, обеспечивающие жёсткость всей нагружающей конструкции; 7 – сварная часть измерительной секции, заглушенная крышкой 9). Внутри секции была расположена склеенная из тонкой вакуумной резины (по размеру внутренней полости камеры 7) оболочка 8, в которую через штуцер 10 подавали сжатый воздух из ресивера до давления P_{cm} ; (P_{cm} в полости 8 измерялись манометром класса точности 0,4).

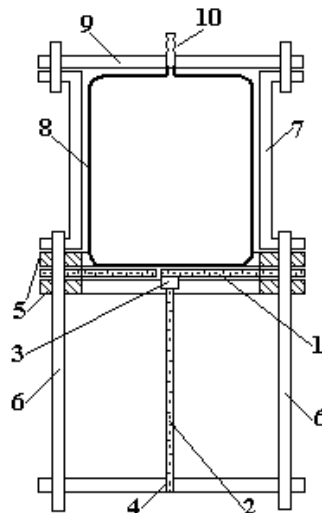


Рис. 2

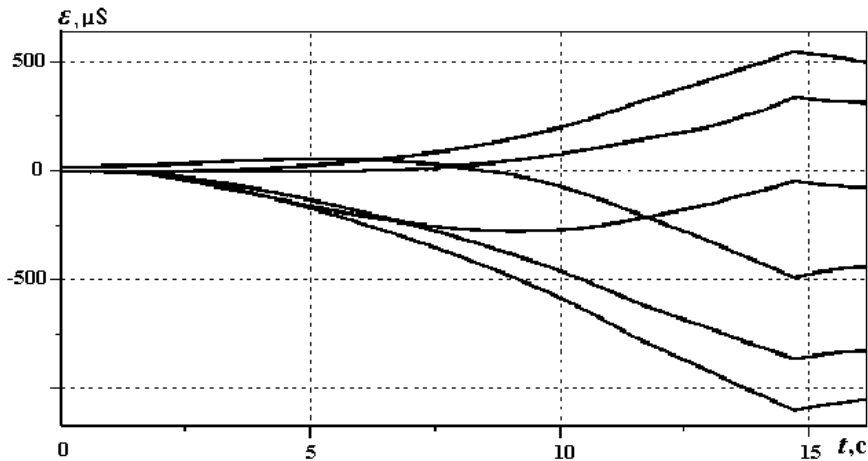


Рис. 3

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма регистрации деформаций на тензостанции LMS SCADAS Mobile (Бельгия) при квазистатическом нагружении консоли 1 (рис. 2). Время регистрации процесса составляло более 15 с. На приведенном «кадре» в течение почти 15с заметно возрастание деформаций, поскольку через штуцер 10 (рис. 2) в оболочку 8 подавался сжатый воздух, давление на консоль возрастало. При давлении $P_{cm} = 0,28 \cdot 10^5$ Па (70 единиц на манометре), штуцер был перекрыт, давление в оболочке в результате утечек снижалось, деформации падали. На каждой из подобных осциллограмм с помощью курсоров фиксировали значения деформаций в момент их максимальных значений.

3. Результаты исследования и их анализ.

Эпюры деформаций тензорезисторов, расположенных с одной стороны стержневой опоры при квазистатических испытаниях системы показаны на рис. 4. Зависимости получены при действии статических нагрузок: 1 – $P_{cm} = 0,16 \cdot 10^5$ Па; 2 – $P_{cm} = 0,24 \cdot 10^5$ Па; 3 – $P_{cm} = 0,28 \cdot 10^5$ Па. По оси абсцисс отложена безразмерная длина стержня l , по оси ординат – значения деформаций тензорезисторов. С точностью до постоянного коэффициента приведенные эпюры можно с погрешностью не более 10% полагать эпюрами изгибных деформаций, так как измерения показали, что значения мембранных деформаций составляли менее 10% значений ε' стержневой опоры. Заметно, что с увеличением нагрузки эпюры деформаций стержня приобретают стабильную форму.

Точки, где деформации сжатия переходят в деформации растяжения, расположены на расстояниях l примерно 0,3 и 0,8 от точки жёсткого защемления. Максимальные деформации растяжения имели место не на середине, а на расстоянии $\approx 0,6$ от точки жёсткого защемления.

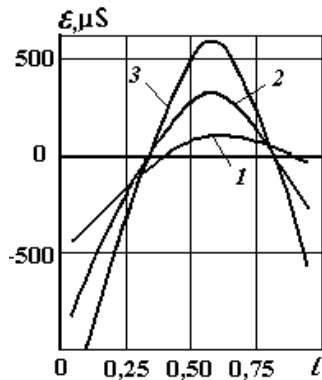


Рис. 4

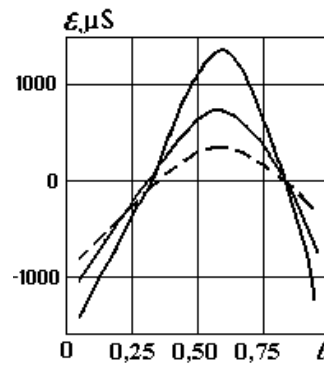


Рис. 5

Анализ экспериментальных данных показал, что в диапазоне всех исследованных уровней нагружения при нестационарном деформировании стержень в течение времени воздействия ударно-волновой нагрузки на консоль многократно изменял свою форму [5]. При этом можно выделить моменты времени, когда форма эпюр в динамике близка к форме статических эпюр (рис. 5). На рисунке пунктиром показана эпюра статических деформаций при действии нагрузки $P_{cm} = 0,24 \cdot 10^5$ Па, сплошными линиями – эпюры динамических деформаций при такой же нагрузке на консоль. Если учитывать указанные моменты и определить коэффициент динамичности как отношение $\varepsilon/\varepsilon_{cm}$, то получим, что при низких нагрузках, когда деформации не превышали $3 \cdot 10^{-3}$, он изменяется от 2 до 4,5.

Знание коэффициента динамичности даёт возможность разработчикам конструкций проводить оценку деформаций её элементов при действии статической нагрузки, не учитывая динамичности процесса. При этом необходимо знать закономерность, по которой формируется нагрузка, действующая на конструкцию в результате падения на неё ударной волны. Экспериментальное исследование нормального падения длинной ударной волны на плоские элементы [4] показало незначительное влияние их деформаций на величину нагрузки. Это означает, что в первом приближении при нормальном падении ударной волны акустического диапазона со скачком давления во фронте ΔP на плоский элемент, последний воспринимает удвоенную нагрузку, т. е. $P = 2\Delta P$, где ΔP – значение скачка давления во фронте ударной волны.

Опыты также свидетельствуют, что форма стержней за период действия ударной волны на консоль ($\sim 8 \cdot 10^{-3}$ с) многократно изменялась, а максимальные значения деформаций различных тензорезисторов не совпадали по времени. Если абстрагироваться от формы стержня и сравнивать наибольшие значения деформаций в динамическом процессе и при такой же нагрузке в статике, то значение коэффициента динамичности получаем различным для разных элементов стержневой опоры. Например, при $P_{cm} = 0,24 \cdot 10^5$ Па и такой же ударно-волновой нагрузке на безразмерном расстоянии $l \approx 0,05$ (вблизи жёсткого защемления) имеем: $\varepsilon/\varepsilon_{cm} \approx 2,8$; при $l \approx 0,5 - 0,6$, а также вблизи крепления второго конца стержня ($l \approx 0,95$) – $\varepsilon/\varepsilon_{cm} \approx 4,5$.

Необходимо принимать во внимание, что слабые ударные волны при нормальном падении на плоские объекты приводят к нагрузкам, вдвое превышающим давление в падающей ударной волне, поэтому по отношению к давлению в ударной волне коэффициент динамичности должен быть удвоен, т.е. его максимальное значение равняется ≈ 9 .

Сопоставление наибольших изгибных деформаций элементов стержня, находящихся на расстоянии $l = 0,6$ от защемленного конца, где стержень испытывает наибольший прогиб, иллюстрирует рис. 6. По оси абсцисс отложены значения нагрузки на консоль при квазистатическом нагружении, а также при падении на консоль ударной волны ступенчатого профиля. По оси ординат отложены значения деформаций в статике (кривая 1) и динамике (кривая 2).

Приведенные результаты свидетельствуют, что упругая система консоль – низкочастотный стержень при низких нагрузках в статике и динамике ведет себя как линейная система, в дальнейшем становясь нелинейной. При этом нелинейность в статике проявляется при более низких нагрузках, чем в динамике. Коэффициент динамичности был определен в диапазоне нагрузок от нуля до $0,28 \cdot 10^5$ Па и в области максимальных прогибов стержневой опоры имел значение $\approx 4,5$, а по отношению к значению давления в падающей ударной волне – 9.

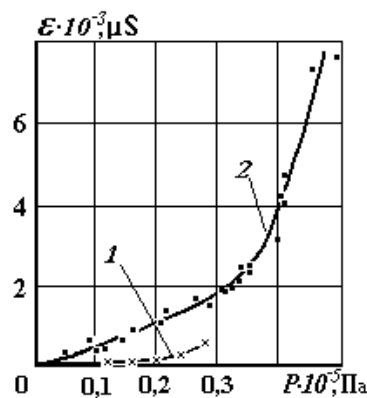


Рис. 6

При статическом нагружении, а также при падении ударной волны на консоль, её наибольшие деформации происходили вблизи защемления. При всех уровнях нагружения значение максимальных деформаций в динамике превышали значения статических деформаций примерно в 1,6 раза.

Заключение.

Таким образом, с помощью высокоточной портативной восьмиканальной аппаратуры LMS SCADAS Mobile (Бельгия) экспериментально исследовано поведение упругой связанной системы, состоящей из консоли и прикрепленного к ней «низкочастотного» стержня при падении плоской ударной волны на консоль, а также при воздействии на неё квазистатической нагрузки. Показано, что стержневая опора ведет себя линейно при действии слабых динамических нагрузок, при которых деформации стержня не превышали $2 \cdot 10^3$ микрострейн, при нагружении консоли квазистатической нагрузкой нелинейность имеет место во всём диапазоне нагрузок, начиная от самых малых значений. При теоретическом анализе подобных задач как при статическом, так и при ударно-волновом нагружении необходима нелинейная постановка задачи. При анализе деформированного состояния стержневой опоры в статике и переносе результатов в область ударно-волновых нагрузок следует использовать коэффициент динамичности не ниже значения 4,5.

РЕЗЮМЕ. Экспериментально досліджено процес деформування пружної системи консоль – стержень при дії ударної хвилі на поверхню консолі, а також при квазістатичному її навантаженні. Реєстрація квазістатичних та нестационарних деформацій проведена на персональному комп'ютері використанням високоточної портативної восьми каналної апаратури LMS SCADAS Mobile (Бельгія). Виявлено, що при теоретичному аналізі подібних задач необхідна нелінійна постановка.

1. Аникьев И.И., Гузь А.Н., Коноваленко В.В., Михайлова М. И., Мороз А.В., Спировский А. С., Сущенко Е. А. Деформирование трехслойной стеклопластиковой панели с ячеистым наполнителем при действии статических и импульсных нагрузок // Проблемы прочности. – 1983. – № 7. – С. 90 – 94.
2. Аникьев И.И., Михайлова М. И., Спировский А. С., Сущенко Е. А. Нестационарное деформирование системы балка – стержень при действии ударной волны // VI Всесоюз. съезд по теорет. и прикл. механике: Аннот. докл. – Ташкент, 1986. – С. 42.
3. Головки К.Г., Луговой П.З., Мейш В.Ф. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках. – К.: Изд.-полиграф. центр «Киевский университет», 2012. – 541 с.
4. Гузь А.Н., Заруцкий В.А. и др. Экспериментальные исследования тонкостенных конструкций. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 с.
5. Anik'ev I.I., Mikhailova M.I., Sushchenko E.A. Experimental Determination of the Reaction of an Elastic Cantilever – Rod System to a Shock Wave // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N6. – P. 736 – 740.
6. Anik'ev I.I., Maksimyuk V.A., Mikhailova M.I., Sushchenko E.A. Incidence of a Shock Wave on a Cantilever Plate Coupled with an Elastic Rod // Int. Appl. Mech. – 2013. – 49, N4. – P. 482 – 487.
7. Anik'ev I.I., Maksimyuk V.A., Mikhailova M.I., Sushchenko E.A. Nonstationary Behavior of Cantilever-Rod System under Nearly Critical Loads // Int. Appl. Mech. – 2013. – 49, N5. – P. 570 – 575.
8. Fomin N.A. 110 years of experiments on shock tubes // J. Eng. Physics and Thermophysics. – 2010. – 83, N 6. – P. 1118 – 1135.
9. Gronostajski Z., Polak S. Quasi-static and dynamic deformation of double-hat thinwalled elements of vehicle controlled body crushing zones joined by clinching // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2008. – 8, N2. – P. 57 – 65.
10. Jing Z., Cheng-wen T., Yu R., Fu-chi W., Hong-nian C. Quasi-static and dynamic tensile behaviors in electron beam welded Ti-6Al-4V alloy // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2011. – 21, N1. – P. 39 – 44.
11. Krehl P.O.K. History of Shock Waves, Explosions and Impact: A Chronological and Biographical Reference. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 1310 p.
12. Menig R., Meyers M.H., Meyers M.A., Vecchio K.S. Quasi-static and dynamic mechanical response of *Haliotis rufescens* (abalone) shells // Acta Materialia. – 2000. – 48, N9. – P. 2383–2398.
13. Püst L. Dynamic deformations and stresses of beams connected by damping element // Eng. Mech. – 2009. – 16, N3. – P. 185 – 196.

Поступила 14.01.2010

Утверждена в печать 26.06.2013