

Ю. В. Морозов, С. И. Снисаренко

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛН ДЕФОРМАЦИЙ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Предложен испытательный стенд для исследования ударного нагружения композитных конструкций типа балок и пластин. Ударное нагружение осуществляется ударником с пьезокерамическим датчиком силы со скоростью до 40 м/с. Регистрация результатов осуществляется с помощью компьютерной измерительной системы. Представлены результаты экспериментов по регистрации контактной силы удара и соответствующие расчеты нестационарных изгибных и сдвиговых волн деформаций для стеклопластиковых балок и пластин.

Ключевые слова: композитные конструкции, ударное нагружение, волны деформаций, компьютерная измерительная система.

В настоящее время композиционные материалы (КМ) применяются в изделиях как военной, так и гражданской авиационной техники по массе, не превышающей 20 %. Стремление увеличить количество композитов до 50 % и более, как это сделано на самолете Boeing-787, впервые представленном в 2007 г., сразу выявило ряд недостатков подобной тенденции, главным образом, из-за недостаточной ударной стойкости применяемых композиционных материалов. Причем речь идет не об ударных повреждениях, вызванных чрезвычайными ситуациями на борту воздушного судна, а о воздействии ударных нагрузок, вполне допустимых в эксплуатации для конструкций из традиционных материалов. Таким образом, в настоящее время существует потребность в создании ударостойких элементов конструкций, выполненных из волокнисто-слоистых композиционных материалов типа стекло- и углепластиков, применение которых в изделиях авиационной техники невозможно без надежных и достоверных экспертных оценок, получаемых в результате комплексного использования численного моделирования и экспериментальных исследований.

На данный момент накоплен богатый опыт теоретических исследований, в которых рассматриваются явления распространения волн деформаций в композитных конструкциях под действием ударного нагружения, обобщенных в монографиях [1–4] и др., в то время как экспериментальных исследований недостаточно. Сложность проведения ударных испытаний по сравнению со статическими заключается в том, что в настоящее время не отработаны в полной мере нормативные требования к испытательным стендам, датчикам и контрольно-измерительной аппаратуре, а также к методикам проведения соответствующих испытаний. Поэтому предъявляются особые требования к точности и надежности получаемых экспериментальных данных.

Для проведения экспериментальных исследований создан автоматизированный испытательный стенд для ударных испытаний и компьютерная измерительная система (КИС) с использованием технологии виртуальных приборов и программного обеспечения LabVIEW фирмы National Instruments (NI). Разработанная методика регистрации контактной силы удара и динамических деформаций позволяет с достаточно высокой точностью определять экспериментальные данные, необходимые для

проведения соответствующих расчетов с целью создания ударостойких композитных изделий.

Автоматизированный испытательный стенд для ударных испытаний. В состав схемы испытательного стенда входят нагружающее устройство, система регистрации скорости удара, система тензометрирования, система динамического силоизмерения, компьютерная измерительная система (рис. 1).

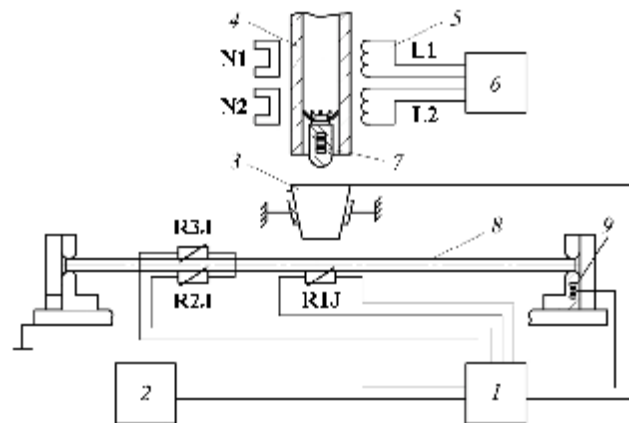


Рис. 1. Схема автоматизированного испытательного стенда для ударного нагружения балок и пластин:

- 1 – модуль нормирования сигналов; 2 – персональный компьютер со встраиваемым устройством сбора данных;
- 3 – коническая контактная поверхность; 4 – направляющий ствол легкогазовой баллистической установки;
- 5 – магнитоиндукционные датчики регистрации скорости ударника; 6 – электронный частотомер для определения скорости ударника; 7 – пьезокерамический датчик-ударник;
- 8 – испытываемый образец (балка, пластина); 9 – универсальная опора с пьезокерамическим датчиком силы

Нагружающее устройство представляет собой легкогазовую баллистическую установку для ударного нагружения объектов ударниками массой $5 \div 100 \cdot 10^{-3}$ кг со скоростью до 40 м/с [1]. Скорость ударника замерялась с помощью магнитоиндукционных датчиков при пролете им базового расстояния между магнитами N1 и N2 с катушками индуктивности L1 и L2. При ударном нагружении балок и пластин нестационарные поверхностные де-

формации регистрировались фольговыми тензодатчиками типа КФ-4П1-5-100-Б-12.

Отличительной особенностью системы динамического силоизмерения является использование датчика-ударника [5] контактной силы удара (величины, продолжительности и формы изменения силы в зоне контакта ударника с объектом), выполненного на основе пьезокерамических таблеток типа ЦТС (диаметром 8 мм и толщиной 2...8 мм). Калибровка пьезокерамических датчиков силы производилась путем статического нагружения полностью собранного динамометра на испытательной машине Р-5 с точностью до 2,5 кг. Существенным моментом при статической калибровке пьезокерамических датчиков силы является замер появляющегося на обкладках пьезокристалла (как правило, металлизированных напылением серебра) напряжения и защита заряда от «стекания». Для этих целей применялся усилитель типа 2628 фирмы Брюль и Кьер. Благодаря высокому входному сопротивлению, достигающему $1,5 \cdot 10^{12}$ Ом, постоянная времени прибора составляет порядка 2000 С, что позволяет измерять статические сигналы от пьезокерамических датчиков силы в режиме калибровки с наименьшими погрешностями.

Регистрация сигналов с тензодатчиков R1J, R2J, R3J и пьезокерамического датчика-ударника осуществлялась компьютерной измерительной системой (рис. 2). Таким образом, в состав КИС входят система тензометрирования, система силоизмерения, а также аппаратные средства и соответствующее программное обеспечение [2].

Аппаратные средства компьютерной измерительной системы следующие:

- нормирующий преобразователь НП1 типа NI SCXI-1520;
- коннекторный блок КБ1 типа NI SCXI-1314;
- нормирующий преобразователь НП2 типа NI SCXI-1120;
- коннекторный блок КБ2 типа NI TBX-1316;
- шасси NI SCXI-1000;
- устройство сбора данных NI PCI-6221M.

Программное обеспечение компьютерной измерительной системы:

- среда графического программирования NI LabVIEW;
- набор драйверов NI DAQmx.

НП1 – восьмиканальный нормирующий преобразователь, необходимый для преобразования изменения сопротивления тензодатчика в электрическое напряжение.

Для присоединения тензодатчиков к НП1 служит коннекторный блок КБ1. Каждый из восьми каналов НП1 содержит резисторы, дополняющие полумостовую схему присоединения тензодатчиков. Датчик RJ1 подключается по четвертьмостовой схеме, а датчики RJ2 и RJ3 – по полумостовой схеме.

НП2 – восьмиканальный нормирующий преобразователь предназначен для измерения высоких напряжений. Коннекторный блок КБ2 служит для подачи на НП2 напряжения с пьезокерамического датчика до 1000 В. Для предотвращения выхода из строя устройства сбора данных и компьютера каждый канал НП2 содержит усилитель с гальванической развязкой и фильтром низкой частоты 10 кГц.

Преобразователи НП1, НП2 и коннекторный блок КБ1 находятся внутри помехозащищенного шасси SCXI-1000, которое имеет блок питания и четыре слота для размещения преобразователей.

Выходные напряжения с НП1 и НП2 поступают на восьмиканальную подсистему аналогового ввода устройства сбора данных (в составе КИС задействованы три измерительных канала: два канала для подключения тензодатчиков и один канал для подключения пьезокерамического датчика). В состав устройства сбора входят также двухканальная подсистема аналогового вывода, восьмиканальная подсистема цифрового ввода-вывода и два счетчика-таймера.

Устройство сбора данных размещается внутри системного блока компьютера и вставляется в слот расширения PCI.

Компьютер осуществляет управление устройством сбора данных и нормирующими преобразователями, производит математическую обработку измеряемых величин, полученных от устройства сбора данных, и отображение результатов на дисплее в числовой и графической форме посредством среды графического программирования LabVIEW, которая поддерживает технологию виртуальных приборов [6]. Взаимодействие LabVIEW с устройством сбора данных и нормирующими преобразователями осуществляется с помощью набора драйверов DAQmx.

Погрешность компьютерной измерительной системы включает в себя погрешности подсистемы аналогового

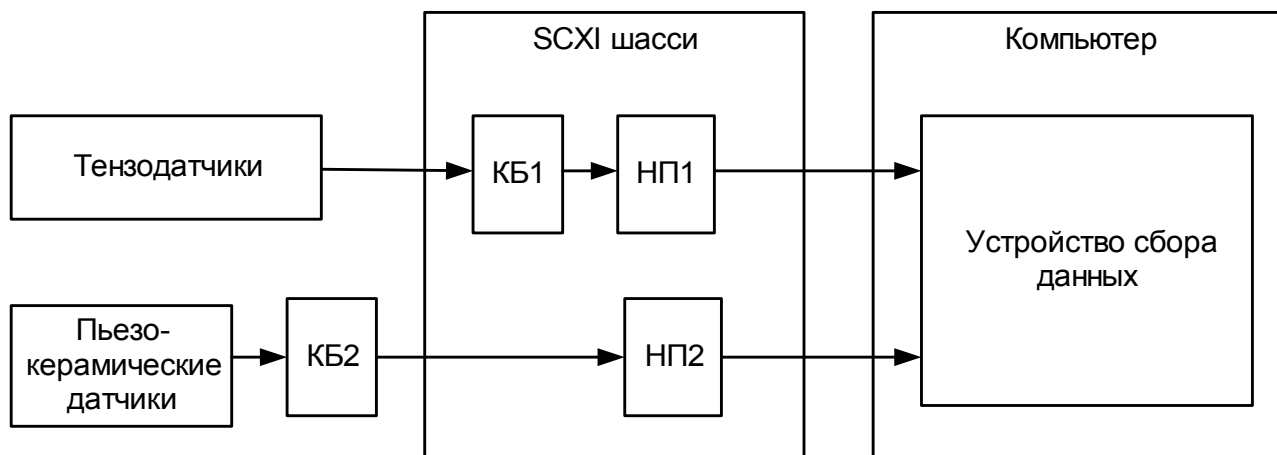


Рис. 2. Структурная схема компьютерной измерительной системы

ввода устройства сбора данных и погрешностей нормирующих преобразователей. Максимальная погрешность подсистемы аналогового ввода устройства сбора данных для диапазона измеряемых напряжений с учетом разрядности аналого-цифрового преобразователя 16 бит составляет 0,02 %. Максимальные погрешности тензометрического нормирующего преобразователя НП1 – 0,2 %, высоковольтного нормирующего преобразователя НП2 – 0,8 % (данные о погрешностях взяты из спецификаций, предоставленных производителем National Instruments). Использование ранее [5] в составе испытательных стендов контрольно-записывающей аппаратуры на базе электронных осциллографов обеспечивало среднеквадратичные погрешности систем тензометрирования – 5,4 %, силоизмерения – 6,1 %. Применение компьютерной измерительной системы позволило уменьшить погрешность измерения до 2 %, благодаря использованию взамен электронных осциллографов технологии виртуальных приборов NI.

Идентификация формы импульсов силы удара. Осциллограмма контактной силы $P(t)$, полученная с помощью датчика-ударника при поперечном центральном ударе по шарнирно опертой балке из стеклопластика с симметричной укладкой волокон $[0_8^0 / \pm 45_8^0 / 90_8^0]$ и геометрическими размерами $(100,0 \times 10,0 \times 10,2) \cdot 10^{-3}$ м представлена на рис. 3. Скорость соударения равна 5 м/с, масса ударника составляет $51 \cdot 10^{-3}$ кг. Характеристики монослоя стеклопластика: $\rho = 1800$ кг/м³, $h = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, $E_{11} = 270 \cdot 10^8$ Н/м², $E_{22} = 70 \cdot 10^8$ Н/м², $G_{12} = 46 \cdot 10^8$ Н/м², $\nu_{12} = 0,26$. Объемная доля полимерного связующего в пакете композита составляет 35 %.

Как известно, при отношении массы балки к массе ударника $m/M < 1$ имеет место одиночный удар [7]. При $m/M > 1$ возникают повторные соударения (рис. 3). В рамках элементарной теории удара это явление можно объяснить следующим образом: в момент столкновения скорость балки превышает скорость ударника и балка опережает ударник, поэтому плотность контакта уменьшается, и при $t \approx 3$ мкс появляется первый относительный максимум; затем скорость балки уменьшается, и она работает как сжимающая пружина, а ударник движется с прежней скоростью, плотность контакта возрастает, и при $t \approx 19$ мкс появляется второй максимум; после этого ударник движется в противоположном направлении, и при $t \approx 86$ мкс происходит отскок.

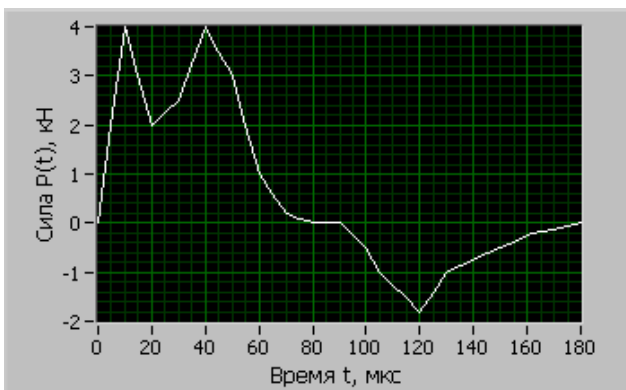
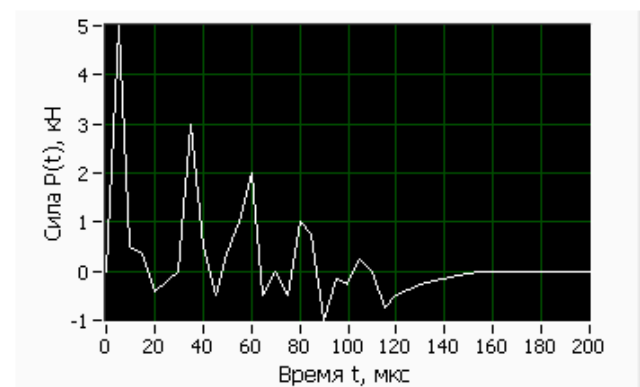


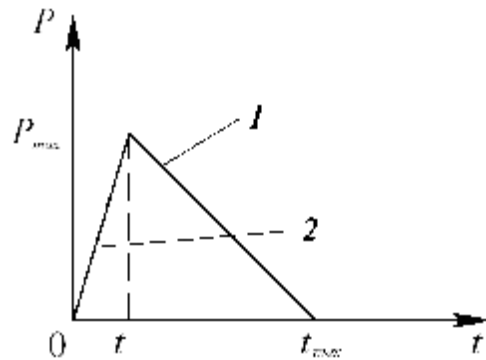
Рис. 3. Осциллограмма контактной силы $P(t)$ при поперечном центральном ударе по шарнирно опертой балке из стеклопластика

Для проведения численных расчетов необходимо аппроксимировать зависимость контактной силы от времени $P(t)$ заданными функциями. В работе [8, с. 8–46] отмечается, что при низкоскоростном (менее 5 м/с) ударном нагружении пластин контактную силу с достаточной степенью точности можно аппроксимировать полуволной синусоиды с максимальной амплитудой P_{\max} и длительностью t_{\max} . Представленные в данной работе результаты экспериментов показали, что при скоростях соударения в диапазоне 5–40 м/с необходимы другие аппроксимации (рис. 4).

Осциллограмма контактной силы $P(t)$, полученная при поперечном центральном ударе по жестко заземленной пластине из стеклопластика с углами укладки волокон $[0_8^0 / \pm 45_8^0 / 90_8^0]$ и геометрическими размерами $(100,0 \times 100,0 \times 7,2) \cdot 10^{-3}$ м представлена на рис. 4, а. Скорость соударения равна 18 м/с, масса ударника – $51 \cdot 10^{-3}$ кг.



а



б

Рис. 4. Осциллограмма контактной силы $P(t)$ (а) и очертание формы импульсов (б) при поперечном центральном ударе по жестко заземленной пластине из стеклопластика:

$$1 - P = P_{\max} (1 - t/t_{\max}); 2 - P = P_{\max} t/t_1$$

Огибающая импульсов повторных соударений представляет собой треугольник с возрастающим и убывающим участками (рис. 4, б). Число повторных соударений увеличивается с ростом скорости ударного нагружения. Оказалось, что такая форма огибающей импульсов сохраняется в диапазоне скоростей соударения 5–40 м/с, при этом начальный участок 2, на котором нагрузка возрастает по времени, на порядок меньше участка 1, на котором нагрузка убывает. Кроме того, начальный участок тем меньше, чем выше скорость удара.

Численное исследование нестационарных деформаций. Расчеты нестационарных деформаций при действии

определенных в настоящей работе функций силы удара $P(t)$ проведены для композитных балок методом конечных элементов (МКЭ). Уравнение движения МКЭ имеет вид

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = P(t)\{\delta_j\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ – матрицы масс, вязкости и жесткости соответственно; $\{\delta\}$ – вектор обобщенных перемещений; $P(t)$ – функция контактной силы удара; $\{\delta_j\}$ – символ Кронекера. Интегрирование уравнения движения МКЭ (1) выполнено методом Рунге–Кутты.

Использовались конечные элементы, учитывающие поперечные сдвиги, согласно теории Тимошенко, предложенные в работе [9]. Расчеты проведены с помощью пакета прикладных программ «UDAR», описанного в [10].

В качестве реологической модели механического поведения композиционных материалов принята линейная зависимость напряжений $\{\sigma\}$ от деформаций $\{\varepsilon\}$ и их скоростей (модель Фойгта) [6]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} + [W]\{\dot{\varepsilon}\},$$

где $[D]$, $[W]$ – приведенные матрицы жесткости и вязкости композиционного материала.

Результаты расчета максимальных значений изгибных $\varepsilon_{\text{н}}$ и сдвиговых $\varepsilon_{\text{с}}$ деформаций по пролету шарнирно опертой углепластиковой балки с углами укладки волокон $[0_8^0 / \pm 45_8^0 / 90_8^0]$ и геометрическими размерами $(250 \times 10 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м представлены на рис. 5. Балка нагружалась центральным поперечным импульсом синусоидальной формы с максимальным значением силы удара $P_{\text{max}} = 2 \cdot 10^3$ Н и временем ее действия $t_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-4}$ с, что соответствует соударению балки ударником массой $51 \cdot 10^{-3}$ кг со скоростью 5 м/с. Точками показаны максимальные экспериментальные значения изгибных деформаций. Различия расчетных и экспериментальных значений не превышает 10 %.

Особенностью нестационарного деформирования балок из волокнисто-слоистых материалов типа стекло- и углепластиков, имеющих малую сдвиговую жесткость, является то, что изгибные и сдвиговые деформации одного порядка. Как показали расчеты (рис. 5), максимальное значение нестационарных изгибных деформаций, имеющих место в центре балки, равно $\varepsilon_{\text{н}} = 0,565\%$, а максимальное значение сдвиговых деформаций $\varepsilon_{\text{с}} = 0,432\%$.

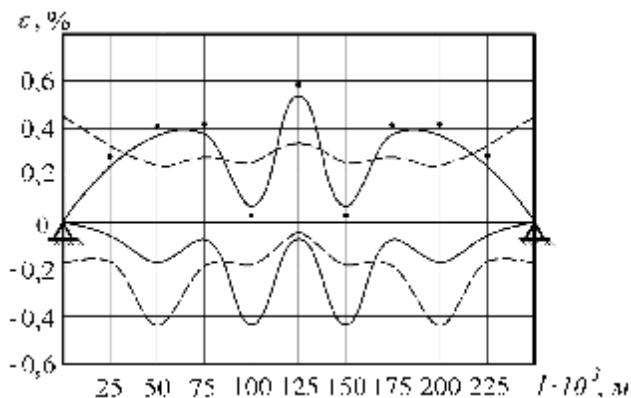


Рис. 5. Максимальные значения изгибных $\varepsilon_{\text{н}}$ (—) и сдвиговых $\varepsilon_{\text{с}}$ (---) деформаций по пролету углепластиковой балки, нагружаемой центральным поперечным импульсом синусоидальной формы: линии – результаты расчета; точки – экспериментальные данные

Сдвиговые деформации одного порядка с изгибными ($\varepsilon_{\text{с}}/\varepsilon_{\text{н}} \approx 0,8 \dots 0,9$), при низкоскоростном (менее 5 м/с) ударном нагружении балок с отношением высоты h в поперечном сечении к длине L в диапазоне $0,04 < h/L < 0,10$. Для коротких балок с отношением $h/L > 0,1$ разрушения следует ожидать в результате сдвиговых деформаций, так как в этом случае они больше изгибных ($\varepsilon_{\text{с}}/\varepsilon_{\text{н}} \approx 1,06$). При скорости ударного нагружения более 5 м/с функцию силы удара $P(t)$, входящую в уравнение (1), следует аппроксимировать треугольным импульсом (см. рис. 4). Как показали расчеты, с уменьшением времени действия контактной силы удара разрушение в результате сдвиговых деформаций может происходить и в случае более длинных балок с отношением $h/L < 0,04$.

Таким образом, применение компьютерной измерительной системы в составе автоматизированного испытательного стенда для проведения ударных испытаний позволяет в два и более раза повысить точность получаемых экспериментальных данных, главным образом, посредством среды графического программирования LabVIEW, которая поддерживает технологию виртуальных приборов.

Установлено, что при поперечном ударе по композитным балкам и пластинам очертание форм импульсов зависит от скорости соударения, которые можно аппроксимировать известными функциями:

- при низкоскоростном ударе до 5 м/с очертание формы импульсов приближается к синусоидальной с максимальной амплитудой P_{max} и длительностью t_{max} ;
- скоростях удара в диапазоне 5...40 м/с очертание формы импульсов можно аппроксимировать треугольным импульсом возрастающей и убывающей нагрузок;
- скоростях удара выше 40 м/с очертание формы импульсов следует аппроксимировать треугольным импульсом только убывающей нагрузки.

Библиографические ссылки

1. Абросимов Н. А., Баженов В. Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2002.
2. Андреев А. Н., Немировский Ю. В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины. Новосибирск : Наука, 2001.
3. Аннин Б. Д. Механика деформирования и оптимальное проектирование слоистых тел. Новосибирск : Изд-во ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2005.
4. Бакулин В. Н., Образцов И. Ф., Потопахин В. А. Динамические задачи нелинейной теории многослойных оболочек. М. : Физматлит, 1998.
5. Снисаренко С. И. Универсальный испытательный стенд и методы исследования композитных балок, пластин и оболочек при ударном нагружении // Научный вестник НГТУ. 2009. № 3 (36). С. 121–129.
6. Евдокимов Ю. В., Линдваль В. Р., Щербаков Г. И. LabVIEW 8 для радиоинженера. М. : ДМК Пресс, 2007.
7. Голоскоков Е. Г., Филиппов А. П. Нестационарные колебания. Киев : Наукова думка, 1977.
8. Динамика удара / пер. с англ. под ред. С. С. Григоряна. М. : Мир, 1985.

9. Рикардс Р. Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига : Зинатне, 1988.

10. Бачурин А. С., Насыров Р. В., Снисаренко С. И. Пакет прикладных программ «UDAR» для задач ударно-

го нагружения и нестационарного деформирования композитных балок, пластин и оболочек // Научный вестник НГТУ. 2009. №3 (36). С. 185–192.

Yu. V. Morozov, S. I. Snisarenko

COMPUTERIZED TEST STAND FOR RESEARCH OF STRAIN WAVES IN COMPOSITE CONSTRUCTIONS

The paper presents a test stand for investigation of composite constructions such as beams and plates to be shock loaded by a striker with piezoelectric force transducer. Velocity of the striker is up to 40 mps. Measurements results are acquired by a computerized measurement system. Experimental results of contact shock force acquisition are stated with following calculations of non-stationary bending and shearing strain waves in glass-fiber-reinforced plastic beams and plates.

Keywords: composite constructions, shock loading, strain waves, computerized measurement system.

© Морозов Ю. В., Снисаренко С. И., 2010

УДК 621.391.6

С. А. Матюнин, В. Д. Паранин, В. И. Левченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОЙ ФУНКЦИИ УПРАВЛЯЕМЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА*

Предложена конструкция управляемых дифракционных структур, основанных на линейном электрооптическом эффекте. Теоретически исследовано влияние ориентации электрооптического кристалла, направления распространения световой волны и распределения управляющего электрического поля на параметры управляемых структур. Приведены показатели эффективности управляемых дифракционных структур и рассчитаны их значения для нескольких частных случаев.

Ключевые слова: электрическое поле, линейный электрооптический эффект, управляемые дифракционные структуры.

Элементы и устройства, основанные на электрооптическом эффекте, широко применяются для управления параметрами оптического излучения, например, интенсивностью, фазой, состоянием поляризации, спектральным составом [1]. Их достоинствами являются: высокое быстродействие (единицы ГГц), большая номенклатура функциональных материалов с различными физическими свойствами. В настоящее время на основе электрооптического эффекта разработаны объемные и планарные модуляторы, коммутаторы, дефлекторы широкополосного и лазерного излучения, перестраиваемые спектральные фильтры и т. п.

Одним из перспективных направлений развития данного класса устройств является разработка электрооптических управляемых дифракционных структур (УДС), обладающих перестраиваемой фазовой функцией [2]. В общем случае конструкция таких элементов включает электрооптический материал, управляющие электроды с

вающие требуемое распределение показателя преломления в объеме материала, а также комплекс функциональных покрытий, обладающих электроизоляционными, защитными, спектроформирующими или поляризационно-избирательными функциями (рис. 1).

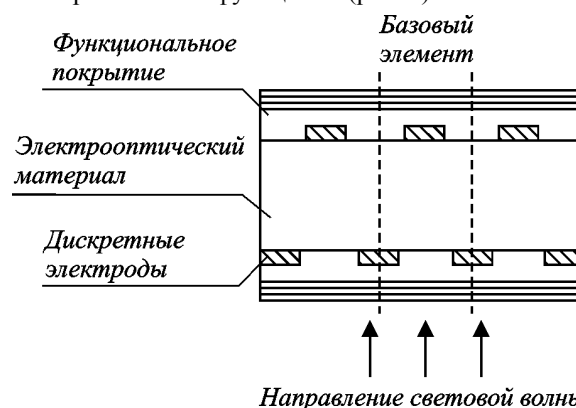


Рис. 1. Общий вид управляемой дифракционной структуры

* Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию РФ (код проекта 10в-Б001-053).