

УДК 629.7:678.067

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФОРМ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ УДАРЕ ПО КОМПОЗИТНЫМ БАЛКАМ И ПЛАСТИНАМ

Г. И. Расторгуев, С. И. Снисаренко

Новосибирский государственный технический университет, 630092 Новосибирск
E-mails: firstpro@adm.nstu.ru, snis@craft.nstu.ru

Описан испытательный стенд для поперечного ударного нагружения балок и пластин при малых скоростях удара (до 40 м/с). Определены контактная сила удара и нестационарные деформации при поперечном ударе по волокнисто-слоистым балкам и пластинам из стекло- и углепластика. Проведена идентификация форм импульсов при различных скоростях соударения в диапазоне $5 \div 40$ м/с. Расчеты ударного нагружения и нестационарного деформирования композитных балок и пластин выполнены методом конечных элементов. Использовались конечные элементы, учитывающие поперечные сдвиги согласно теории Тимошенко и вязкоупругое поведение материала в соответствии с моделью Фойгта.

Ключевые слова: композитные конструкции, балки, пластины, ударное нагружение, нестационарное деформирование.

Введение. Сложность проведения экспериментальных исследований ударного нагружения и нестационарного деформирования композитных конструкций заключается в том, что в настоящее время не существует четко определенных нормативных требований к испытательным стендам, датчикам и контрольно-измерительной аппаратуре, а также к методикам проведения соответствующих испытаний. Поэтому предъявляются повышенные требования к точности и достоверности получаемых экспериментальных данных [1–8].

При экспериментальном исследовании процессов соударения возникает проблема определения контактной силы $P(t)$ при поперечном ударе по пластинам. Как известно, при скоростях ударного нагружения пластин, не превышающих 5 м/с, величина и продолжительность действия контактной силы удара зависят от жесткости пластины, материала поверхности, площади контакта и др. (см., например, [3, 5]). В настоящей работе представлены экспериментальные данные, позволяющие идентифицировать формы импульсов при поперечном ударе по композитным балкам и пластинам при различных скоростях соударения в диапазоне $5 \div 40$ м/с. С использованием идентифицированной функции контактной силы $P(t)$ методом конечных элементов проведены численные расчеты динамического поведения композитных балок и пластин при различных скоростях соударения.

1. Испытательный стенд для ударного нагружения. Схема испытательного стенда для исследования нестационарных процессов деформирования балок и пластин при поперечном ударном нагружении показана на рис. 1. Особенностью используемой системы измерения силы является наличие специального датчика, регистрирующего контактную силу и представляющего собой цилиндр, изготовленный из стали марки Ст. 45, со сферической контактной поверхностью радиусом $16 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 2). Масса ударника может изменяться в диапазоне $(16 \div 200) \cdot 10^{-3}$ кг за счет установки сменных упорных винтов с головками различной массы. В цилиндрическую полость датчика-ударника между

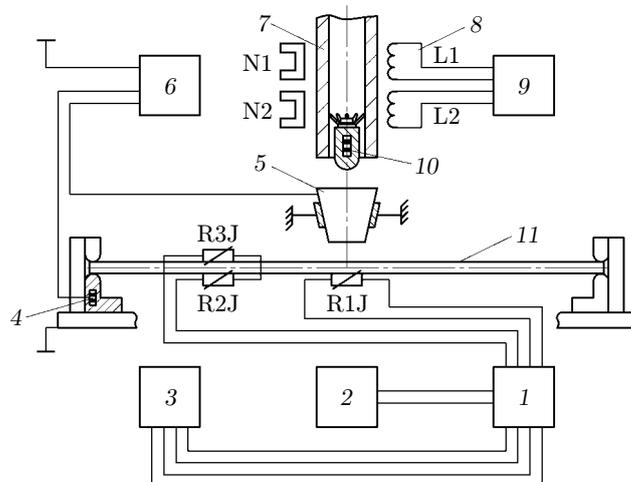


Рис. 1. Схема испытательного стенда для ударного нагружения балок и пластин: 1 — высокочувствительный усилитель; 2 — блок динамической тарировки; 3 — электронный осциллограф для регистрации нестационарных деформаций; 4 — пьезокерамический датчик силы в опорном закреплении; 5 — коническая контактная поверхность; 6 — электронный осциллограф для регистрации контактной силы удара; 7 — направляющий ствол легкогазовой баллистической установки; 8 — магнитоиндукционные датчики регистрации скорости ударника при пролете базового расстояния между магнитами N1 и N2 с катушками индуктивности L1 и L2; 9 — электронный частотомер для определения скорости ударника; 10 — пьезокерамический датчик-ударник; 11 — испытываемый образец (балка, пластина)

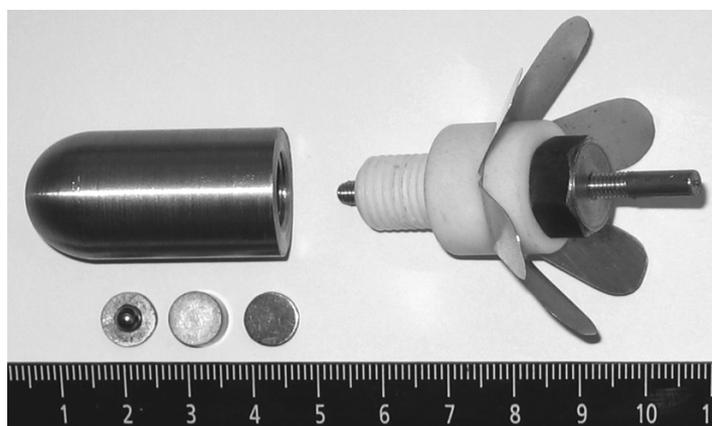


Рис. 2. Датчик, регистрирующий контактную силу удара

двумя шаровыми опорами помещена пьезокерамическая таблетка. Контактные пластины-лепестки, выполненные из латунной фольги толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м, служат для обеспечения электрического контакта между направляющим стволом и токопроводящей поверхностью испытываемого образца (см. рис. 1), вследствие чего происходит запуск развертки осциллографа по сигналу с пьезокерамической таблетки. В случае наличия изолирующей поверхности в зоне контакта наносится токопроводящий графитовый слой.

При регистрации нестационарных процессов деформирования, обусловленных распространением волн деформаций, суммарная среднеквадратичная погрешность системы тензометрирования, определенная в соответствии с разработанной методикой [9], составляет 0,054, погрешность измерения силы — 0,061.

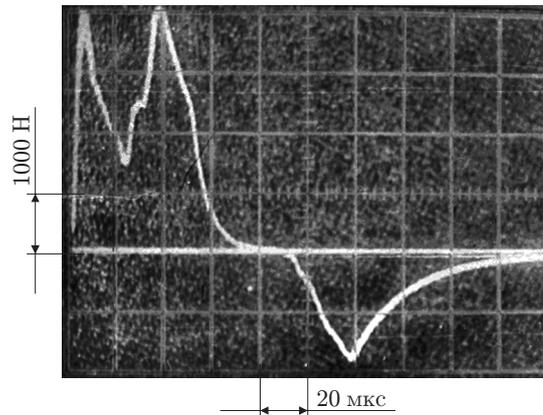


Рис. 3. Оциллограмма контактной силы $P(t)$ при поперечном центральном ударе по шарнирно опертой балке из стеклопластика

2. Идентификация формы импульсов. На рис. 3 представлена оциллограмма контактной силы $P(t)$, полученная с помощью датчика-ударника при поперечном центральном ударе по шарнирно опертой балке из стеклопластика с симметричной укладкой волокон $[0_8^\circ / \pm 45_8^\circ / 90_8^\circ]$ и геометрическими размерами $(100,0 \times 10,0 \times 10,2) \cdot 10^{-3}$ м. Скорость соударения равна 5 м/с, масса ударника — $51 \cdot 10^{-3}$ 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, $\nu_{12} = 0,26$. Проводились также эксперименты с балками из углепластика со следующими характеристиками монослоя: $\rho = 1450$ кг/м³, $h = 0,125 \cdot 10^{-3}$ м, $E_{11} = 1400 \cdot 10^8$ Н/м², $E_{22} = 85 \cdot 10^8$ Н/м², $G_{12} = 61 \cdot 10^8$ Н/м², $\nu_{12} = 0,28$. 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 (см., например, [7, 10]). При $m/M > 1$ возникают повторные соударения (см. 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. В результате 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.

Для проведения численных расчетов необходимо аппроксимировать зависимость контактной силы от времени $P(t)$ заданными функциями. В работах [5. С. 8–46; 11] и др. отмечается, что при низкоскоростном (менее 5 м/с) ударном нагружении пластин контактную силу с достаточной степенью точности можно аппроксимировать полуволевой синусоидой с максимальной амплитудой P_{\max} и длительностью t_{\max} . Представленные в настоящей работе результаты экспериментов показали, что при скоростях соударения в диапазоне $5 \div 40$ м/с необходимы другие аппроксимации.

На рис. 4, а представлена оциллограмма контактной силы $P(t)$, полученная при поперечном центральном ударе по жесткозащемленной пластине из стеклопластика с углами укладки волокон $[0_8^\circ / \pm 45_8^\circ / 90_8^\circ]$ и геометрическими размерами $(100,0 \times 100,0 \times 7,2) \cdot 10^{-3}$ м. Скорость соударения равна 18 м/с, масса ударника — $51 \cdot 10^{-3}$ кг. Огибающая импульсов повторных соударений представляет собой треугольник с возрастающим и убывающим участками (рис. 4, б). Число повторных соударений увеличивается с ростом скорости

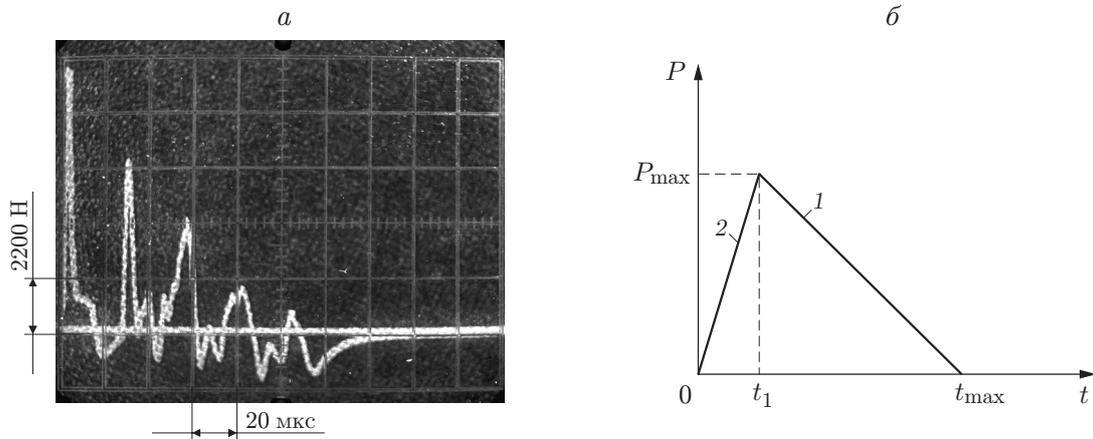


Рис. 4. Осциллограмма контактной силы $P(t)$ (а) и форма импульсов (б) при поперечном центральном ударе по жесткозашемленной пластине из стеклопластика:

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

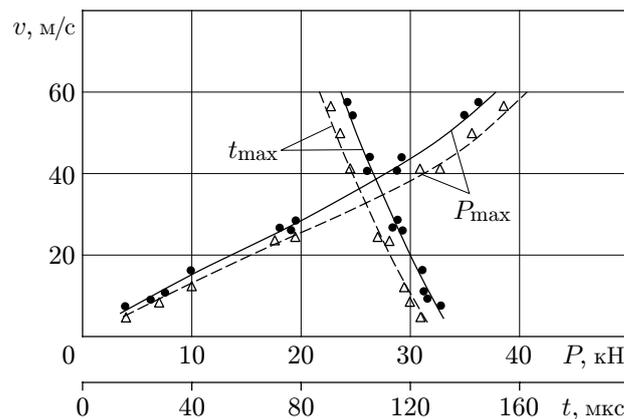


Рис. 5. Максимальные величины контактной силы P_{\max} и продолжительности ее действия t_{\max} при ударе по жесткозашемленной пластине из композита, состоящего из слоев стекло- и углепластика, при различных скоростях соударения: сплошные кривые — удар со стороны стеклопластика, штриховые — удар со стороны углепластика; линии — результаты расчета; точки — экспериментальные данные

ударного нагружения. Оказалось, что такая форма огибающей импульсов сохраняется в диапазоне скоростей соударения $5 \div 40$ м/с, при этом длина начального участка, на котором нагрузка возрастает по времени, на порядок меньше длины участка, на котором нагрузка убывает. Кроме того, длина начального участка тем меньше, чем выше скорость удара. При скоростях удара более 40 м/с, вплоть до скорости пробивания, разрушения пластины следует ожидать на восходящей ветви импульса (см. рис. 4, б), поэтому в данном случае контактную силу следует аппроксимировать треугольным импульсом только возрастающей нагрузки.

При поперечном ударе по углепластиковым пластинам максимальное значение силы P_{\max} и время ее действия t_{\max} оказываются другими. Поэтому проведены эксперименты по ударному нагружению пластин из композитов, состоящих из слоев стекло- и углепластика с углами укладки волокон $[0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ]$ и геометрическими размерами $(100,0 \times 100,0 \times 10,2) \cdot 10^{-3}$ м, при различных скоростях ударного нагружения, результаты

которых представлены на рис. 5. Удар осуществлялся по одной и той же пластине (как со стороны углепластика, так и со стороны стеклопластика) ударником массой $51 \cdot 10^{-3}$ кг. Оказалось, что при ударе со стороны стеклопластика в диапазоне скоростей соударения $5 \div 40$ м/с максимальные значения силы удара P_{\max} приблизительно на 15 % меньше, а время полного прекращения контакта t_{\max} примерно на 10 % больше, чем при ударе со стороны углепластика. В этом случае в гибридной композитной пластине возникают меньшие деформации и напряжения. Таким образом, применение стеклопластика в качестве защитного лицевого слоя для углепластиковой пластины повышает ее ударостойкость при низкоскоростном ударе в диапазоне скоростей соударения $5 \div 40$ м/с. При высокоскоростном (более 200 м/с) ударном нагружении указанный эффект усиливается за счет потери кинетической энергии ударника и расходования ее на деформационные процессы в пластине при ее пробитии (см., например, [1. С. 50–92, 391–483]).

3. 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 [12]. Для волокнисто-слоистой многослойной балки выбран конечный элемент третьего порядка с двумя узловыми точками и четырьмя обобщенными перемещениями в узле:

$$\{\delta^e\}^T = \{w_0, w'_0, \gamma_0, \gamma'_0, w_1, w'_1, \gamma_1, \gamma'_1\}.$$

Здесь w_0 , w_1 — прогибы; γ_0 , γ_1 — углы поворота.

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

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

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

На рис. 6 представлены результаты расчета максимальных значений изгибных ε_n и сдвиговых ε_c деформаций по пролету шарнирно опертой углепластиковой балки с углами укладки волокон $[0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ]$ и геометрическими размерами $(250 \times 10 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м. Балка нагружалась центральным поперечным импульсом синусоидальной формы с максимальным значением силы удара $P_{\max} = 2 \cdot 10^3$ Н и временем ее действия $t_{\max} = 2 \cdot 10^{-4}$ с, что соответствует соударению балки и ударника массой $51 \cdot 10^{-3}$ кг со скоростью 5 м/с. Точками показаны максимальные экспериментальные значения изгибных деформаций, полученные с помощью тензодатчиков R2J и R3J (см. рис. 1) типа КФ-4П1-5-100-Б-12 и электронного осциллографа типа С8-13. Тензодатчик R1J предназначен для синхронизации момента запуска развертки осциллографа с моментом воздействия изгибной волны на тензодатчики R2J или R3J. Симметричное расположение тензодатчиков R2J и R3J исключает продольные деформации при поперечном ударном нагружении и нестационарном деформировании пластин. Различие расчетных и экспериментальных значений не превышает 10 %.

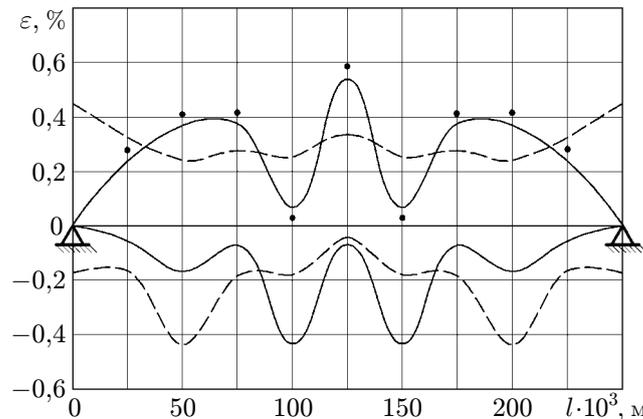


Рис. 6. Максимальные значения изгибных $\varepsilon_{и}$ (сплошные линии) и сдвиговых $\varepsilon_{с}$ (штриховые линии) деформаций по пролету углепластиковой балки, нагружаемой центральным поперечным импульсом синусоидальной формы: линии — результаты расчета; точки — экспериментальные данные

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 (см. рис. 6), максимальное значение нестационарных изгибных деформаций, имеющих место в центре балки, равно $\varepsilon_{и} = 0,565\%$, а максимальное значение сдвиговых деформаций $\varepsilon_{с} = 0,432\%$. Таким образом, при низкоскоростном (менее 5 м/с) ударном нагружении балок с отношением высоты h в поперечном сечении к длине L в диапазоне $0,04 < h/L < 0,10$ сдвиговые деформации одного порядка с изгибными ($\varepsilon_{с}/\varepsilon_{и} \approx 0,8 \div 0,9$). Для коротких балок с отношением $h/L > 0,1$ разрушения следует ожидать в результате сдвиговых деформаций, так как в этом случае они больше изгибных ($\varepsilon_{с}/\varepsilon_{и} \approx 1,06$). При скорости ударного нагружения, превышающей 5 м/с, с уменьшением времени действия контактной силы удара разрушение в результате сдвиговых деформаций может происходить и в случае более длинных балок с отношением $h/L < 0,04$. Данный результат совпадает с результатами, полученными в работе [13].

Как показано в настоящей работе, с увеличением скорости ударного нагружения в диапазоне $5 \div 40$ м/с вплоть до скорости пробивания форма импульсов контактной силы удара близка к треугольной с максимальной амплитудой P_{\max} и длительностью t_{\max} . На рис. 7 представлены результаты расчетов нестационарных изгибных $\varepsilon_{и}(t)$ и сдвиговых $\varepsilon_{с}(t)$ деформаций шарнирно опертой углепластиковой балки с углами укладки волокон $[0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}]$ и геометрическими размерами $(250 \times 10 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м в сечении, находящемся на расстоянии $x = L/5$ от точки приложения центрального поперечного импульса треугольной формы, при $t_{\max}/t_1 = 10$ (см. рис. 4, б). При длительности импульса удара $t_{\max} = 400 \cdot 10^{-6}$ с (штриховая линия на рис. 7, а) максимальные значения нестационарных изгибных деформаций больше максимальных сдвиговых деформаций (штриховая линия на рис. 7, б). При уменьшении длительности импульса до $t_{\max} = 25 \cdot 10^{-6}$ с соотношение между изгибными и сдвиговыми деформациями меняется: изгибные деформации (сплошная линия на рис. 7, а) становятся меньше сдвиговых (сплошная линия на рис. 7, б).

Таким образом, использование зависимости идентифицированных функций силы удара от скорости соударения при численном исследовании нестационарного деформирования позволяет не только повысить точность расчетов, но и определить характер разрушения композитных конструкций.

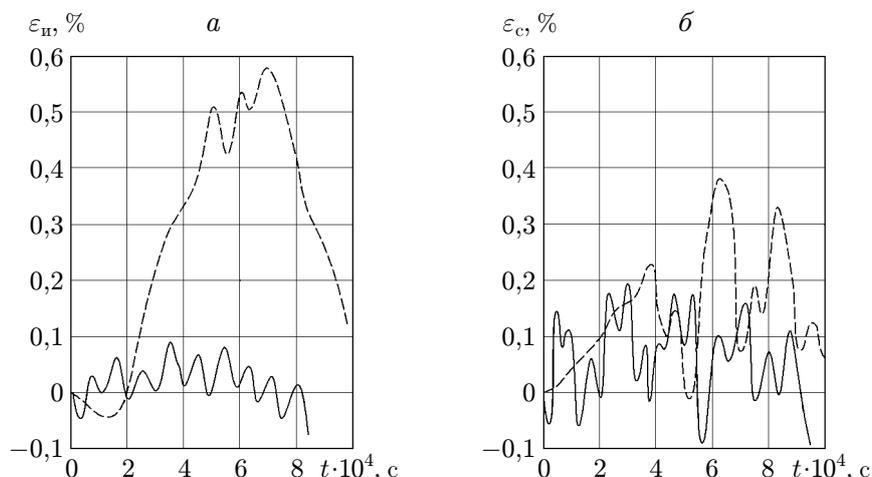


Рис. 7. Зависимости от времени нестационарных изгибных (а) и сдвиговых (б) деформаций углепластиковой балки, нагружаемой центральным поперечным импульсом треугольной формы ($P_{\max} = 2 \cdot 10^3$ Н): сплошные линии — $t_{\max} = 25 \cdot 10^{-6}$ с, штриховые — $t_{\max} = 400 \cdot 10^{-6}$ с

Заключение. Анализ представленных результатов экспериментов по определению контактной силы при поперечном ударе по композитным балкам и пластинам в зависимости от скорости ударного нагружения и результатов численных расчетов нестационарных деформаций позволяет сделать следующие выводы.

При поперечном ударном нагружении композитных балок и пластин контактная сила зависит от скорости ударного нагружения. При низкоскоростном (менее 5 м/с) ударе форма импульсов приближается к синусоидальной с максимальной амплитудой P_{\max} и длительностью t_{\max} . При скоростях удара в диапазоне 5 ÷ 40 м/с форму импульсов можно аппроксимировать треугольным импульсом с возрастающим и убывающим участками.

Для несущих конструкций из углепластика использование лицевых покрытий из стеклопластика в условиях ударного нагружения приводит к снижению его интенсивности до 15 % и, следовательно, к повышению ударостойкости конструкции в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Теоретические** и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А. В. Герасимова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007.
2. **Абросимов Н. А.** Нелинейные задачи динамики композитных конструкций / Н. А. Абросимов, В. Г. Баженов. Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2002.
3. **Фомин В. М.** Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин, А. И. Гулидов, Г. А. Сапожников и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
4. **Кармишин А. В.** Методы динамических расчетов и испытаний тонкостенных конструкций / А. В. Кармишин, А. И. Жуков, В. Г. Колосов и др. М.: Машиностроение, 1990.
5. **Динамика удара** / Под ред. С. С. Григоряна. М.: Мир, 1985.
6. **Гольдсмит В.** Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Стройиздат, 1985.
7. **Голоскоков Е. Г.** Нестационарные колебания / Е. Г. Голоскоков, А. П. Филиппов. Киев: Наук. думка, 1977.
8. **Кильчевский Н. А.** Динамическое контактное сжатие твердых тел: Удар. Киев: Наук. думка, 1976.

9. **Кокошвили С. М.** Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978.
10. **Тимошенко С. П.** Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959.
11. **Yener M., Wolcott E.** Damage assessment analysis of composite pressure vessels subjected to random impact loading // J. Appl. Mech. 1989. V. 111. P. 124–129.
12. **Рикардс Р. Б.** Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988.
13. **Богданович А. Е.** Нелинейные задачи динамики цилиндрических оболочек. Рига: Зинатне, 1987.

*Поступила в редакцию 26/XI 2008 г.,
в окончательном варианте — 31/III 2009 г.*
