



## ОБНАРУЖЕНИЕ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРА

В. С. ЕРЕМЕНКО, В. М. МОКИЙЧУК, А. М. ОВСЯНКИН

*Рассмотрена возможность обнаружения локальных ударных повреждений композиционных материалов методом низкоскоростного удара. Даны краткие технические характеристики системы диагностики, с помощью которой проводили исследования. Приведены результаты экспериментальных исследований для зон с нанесенным повреждающим ударом в диапазоне от 2 до 5,1 кДж. На основе экспериментальных данных показаны преимущества метода низкоскоростного удара по сравнению с импедансным.*

*Observed possibility of discovery of local shock damages of composition materials is considered by the method of low-velocity impact. Short technical descriptions of the system of diagnostics are given which researches were conducted on. The results of experimental researches are resulted for areas with inflicted damaging impact in a range from 2 to 5,1 kDg. On the basis of experimental data the advantages of method of low-speed impact on comparison with impedance method are shown.*

Метод низкоскоростного удара для контроля композиционных материалов был предложен в работах [1, 2]. Он основан на измерении параметров ударного взаимодействия бойка измерительного датчика и контролируемой зоны объекта. Измерительный датчик представляет собой ударный механизм в виде электромагнита, разгоняющего до заданной скорости шток, на котором установлены датчик динамической силы и бойок, контактирующий с поверхностью изделия.

При воздействии на объект бойка, имеющего кинетическую энергию  $A = mv^2/2$ , где  $m$  — масса штока;  $v$  — скорость бойка в момент, предшествующий удару, возникает импульс силы ударного взаимодействия, который характеризуется амплитудой, длительностью, формой. Так как большинство композиционных материалов имеют относительно малые модули упругости по сравнению с материалом бойка ударного механизма, то длительность соударения намного превосходит период собственных колебаний бойка, и эти колебания практически не влияют на форму импульсов соударения. Поэтому подвижную систему будем рассматривать как сосредоточенную массу.

Максимальное значение силы ударного взаимодействия в упругой области, согласно работам [3, 4], можно записать как  $F_m = \sqrt{2A/K}$ , где  $K$  — податливость зоны контакта.

Поэтому при постоянной кинетической энергии удара  $A$  сила ударного взаимодействия будет обратно пропорциональна податливости зоны соударения.

Согласно теории Герца при контакте двух упругих тел (в нашем случае контролируемого образца и бойка ударного механизма, который деформирует этот образец пластически), податли-

вость  $K$  зоны контакта будет представлять собой сумму значений  $K_1$  и  $K_2$  податливости обеих контактирующих поверхностей [5]:

$$K = K_1 + K_2 = \frac{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)^{2/3}}{1,82 \sqrt[3]{F_m r}} \approx \frac{\left(\frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)^{2/3}}{1,82 \sqrt[3]{F_m r}},$$

где  $r$  — радиус кривизны бойка;  $\mu_1, \mu_2$  и  $E_1, E_2$  — коэффициенты Пуассона и модули Юнга соответственно материала бойка и контролируемого изделия.

При условии постоянства площади контакта упругая податливость ведет себя как линейная пружина. Поэтому наличие дефекта в контролируемом изделии аналогично вводу пружины с податливостью  $K'$  между бойком и изделием, следовательно, податливость дефектной зоны увеличивается с увеличением величины дефекта:  $K_d = K + K'$ .

В общем случае рассчитать податливость дефектного участка не представляется возможным, так как не определены форма дефекта, граничные условия и координаты ударного воздействия. Поэтому будем рассматривать дефект в виде зажатой по контуру круглой пластины, имеющей условный диаметр  $d$  и толщину  $h$ , которая соответствует толщине отделенного дефектом (например, непроклеем) слоя [6]. В этом случае податливость в центре пластины, которой моделируется дефект, определяется как

$$K_d = \frac{3d^2(1 - \mu_2^2)}{16\pi E_2 h^3}.$$

Следовательно, податливость дефектной области возрастает с увеличением геометрических

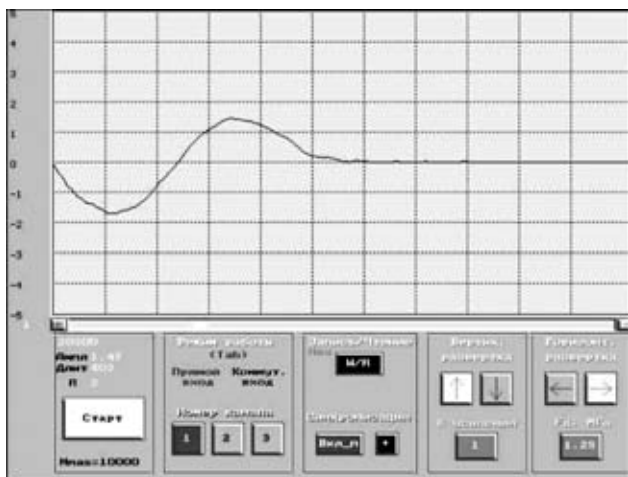


Рис. 1. Интерфейс пользователя системы

размеров дефектов и уменьшается с увеличением глубины их залегания.

Таким образом, наличие дефектов в зоне соударения обуславливает увеличение податливости данной зоны, что будет приводить к уменьшению амплитуды регистрируемого импульса силы ударного взаимодействия. В то же время, в силу закона сохранения площадь ударного импульса при постоянной энергии удара должна оставаться неизменной, следовательно, происходит увеличение времени контактного взаимодействия.

На основании изложенных выше кратких сведений по теории удара можно сделать вывод, что основными диагностическими признаками метода низкоскоростного удара являются амплитуда и длительность импульса силы ударного взаимодействия. Необходимо также отметить, что в зависимости от физико-механических характеристик зоны контакта изменяется и форма импульса силы, поэтому параметры, зависящие от формы, также могут быть использованы в качестве информативных характеристик контроля [7, 8].

Для проведения исследований по возможности использования метода низкоскоростного удара для контроля композиционных материалов, применяемых в авиастроительной отрасли, была разработана система диагностики, представляющая собой программно-аппаратный комплекс на базе персонального компьютера. В состав системы входит порт аналого-цифрового ввода-вывода типа ET-1250, собранный на основе 12-тиразрядного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации до 10 МГц, осуществляющий первичную обработку информационных сигналов, измерительного датчика, который представляет собой электромагнитный ударный механизм, обеспечивающий нанесение ударного воздействия на контролируемую зону с энергией 5...50 мДж, в наконечнике которого установлен пьезоэлектрический преобразователь динамической силы и электронный блок возбуждения измерительного датчика.

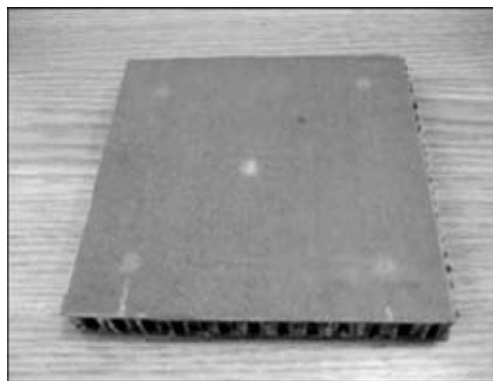


Рис. 2. Образец композитной панели

Программное обеспечение системы представляет собой независимый интерфейс, обеспечивающий контроль и управление процессом сбора, обработки, хранения и интерпретации информации, полученной от объекта контроля. Автономная работа интерфейса осуществляется в среде MS DOS и не требует установки дополнительных программ или библиотек. Программное обеспечение позволяет проводить обработку информационных сигналов и осуществлять принятие диагностического решения в реальном времени. Интерфейс пользователя системы представлен на рис. 1.

Экспериментальные исследования проводили на образцах композитных панелей с сотовым наполнителем типа ИСП-1 и обшивкой на основании стеклоткани Т42/1-76. Толщина панели составляет 12 мм, толщина обшивки — 1,5 мм (рис. 2).

Моделями дефектов служили зоны с нанесенным точечным ударом с нормированной энергией  $A_{уд}$  в диапазоне от 2,0 до 5,1 кДж. Видимые размеры зон разрушения не превышали 5 мм (рис. 3).

С помощью разработанной системы были получены осциллограммы с пьезоэлектрического датчика силы ударного взаимодействия в бездефектной зоне и зонах с различными ударными повреждениями (указана энергия, с которой наносили повреждающие удары на образцы) (рис. 4).

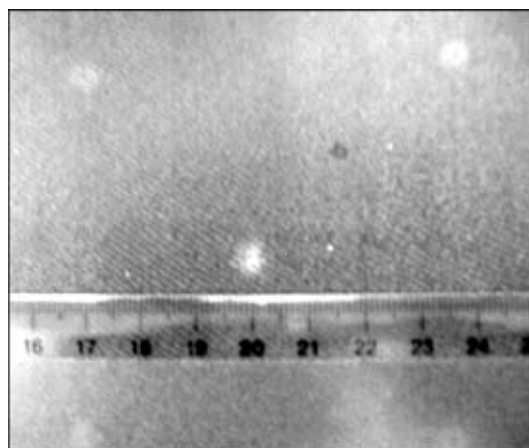


Рис. 3. Модель дефекта

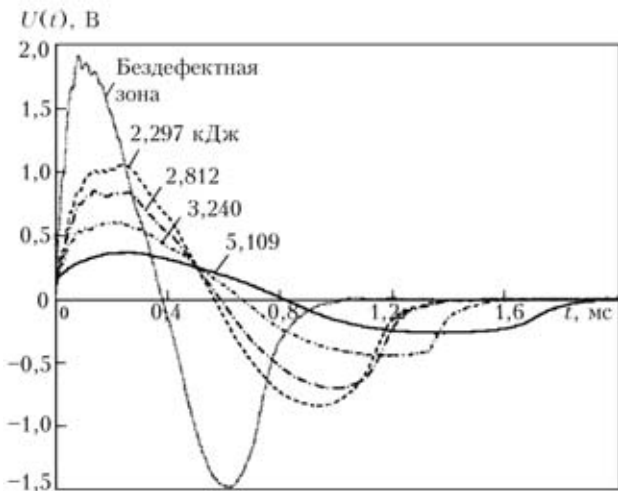


Рис. 4. Осциллограммы импульсов силы ударного взаимодействия

Ударные импульсы измеряли в центрах зон повреждения. Полученные осциллограммы подтверждают теоретические выводы о том, что в качестве информативных параметров контроля наиболее целесообразно использовать амплитуду и длительность измеряемых импульсов. Для одновременного учета обоих параметров рассчитывали коэффициент

$$R = U_m / \tau_{\text{имп}}$$

где  $U_m$ , В — амплитуда первой полуволны регистрируемого импульса;  $\tau_{\text{имп}}$ , с — длительность первой полуволны.

Зависимость коэффициента  $R$  от степени повреждения поверхности сотовой панели (энергии повреждающего удара) представлена на рис. 5.

Интерес также представляет исследование возможности определения истинных размеров зоны повреждения сотовой панели с помощью предлагаемого метода. С этой целью были получены информационные сигналы в видимом центре ударного повреждения и в точках, расположенных со смещением от центра к краю повреждения с шагом 2 мм. Осциллограммы данных сигналов для панели с нанесенным повреждающим ударом с энергией 5,1 кДж представлены на рис. 6.

Графики зависимости коэффициента  $R$  от координаты положения измерительного датчика при прохождении его с шагом 2 мм через дефектные зоны, образованные повреждающими ударами с энергией 2,0 и 5,1 кДж, представлены на рис. 7.

Данные графики показывают, что измеренные диаметры зон повреждений составляют 18 мм для удара с энергией 2,0 кДж и

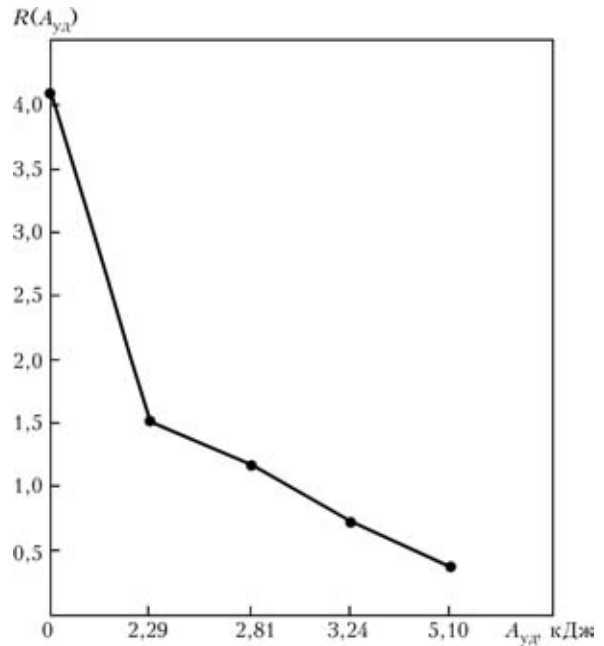


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $R$  от энергии повреждающего удара  $A_{\text{уд}}$

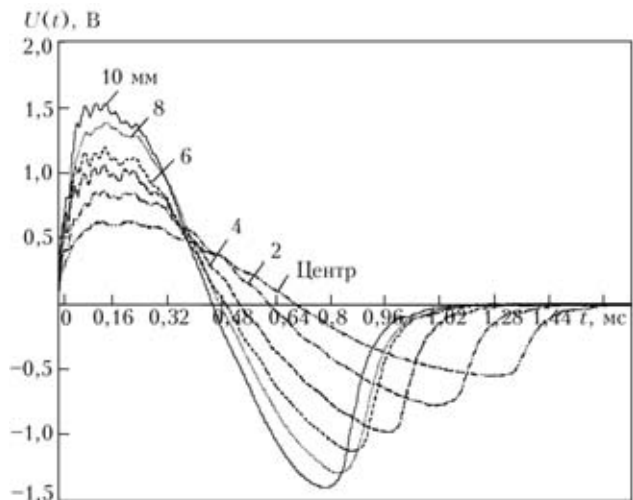


Рис. 6. Осциллограммы импульсов в центре ударного повреждения и в точках со смещением от центра к краю повреждения с шагом 2 мм

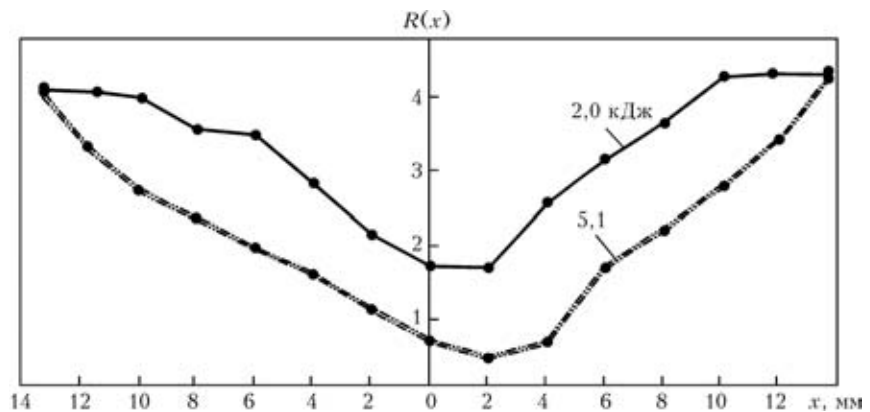


Рис. 7. Зависимости коэффициента  $R$  от координаты положения измерительного датчика относительно видимого центра дефекта



28 мм для удара с энергией 5,1 кДж (на рис. 7 это области, в которых коэффициент  $R$  принимает значения, меньшие 4), а также то, что истинные центры зон повреждения (минимумы на приведенных графиках) смещены относительно визуально определенных центров приблизительно на 2 мм. При визуальном определении размеров данных зон по изменению структуры поверхности сотовых панелей их значения не превышали 5 мм.

Для сравнения в работе [9] исследовали аналогичные образцы с помощью импедансного метода с использованием стандартного датчика ПС-1. Данные исследования показывают, что зона повреждения локализовалась с точностью, не превышающей 10 мм, что не позволяет измерять ее истинные размеры. Сравнивая приведенные в указанной работе зависимости с зависимостями, представленными на рис. 7, можно сделать вывод, что метод низкоскоростного удара имеет гораздо более высокую чувствительность к ударным повреждениям в композиционных материалах, чем широко известный импедансный метод.

1. Adams R. D., Cawley P. Low-velocity impact inspection of bonded structures // Proc. of the intern. conf. on structural adhesives in engineering. — Bristol, 1986. — P. 139–142.

2. Cawley P., Adams R. D. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing // J. of sound and vibration. — 1988. — 2 (122). — P. 299–313.
3. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. — М.: Мир, 1971. — 316 с.
4. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремова, А. М. Федосов. — М.: Машиностроение, 1977. — 240 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965. — 204 с.
6. Cawley P., Clayton D. L. R. A vibration technique for the measurement of contact stiffness // Mechanical systems and signal processing. — 1987. — № 1. — P. 273–283.
7. Еременко В. С., Мокійчук В. М. Исследование диагностических признаков в статистической диагностике изделий методом низкоскоростного удара // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 5. — С. 58–60.
8. Еременко В. С., Мокійчук В. М. Використання векторних зображень інформативних сигналів при низькочастотній акустичній діагностиці матеріалів // Вісник Нац. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Серія «Приладобудування». — 2004. — Вип. 28. — С. 115–119.
9. Повышение информативности акустического контроля конструкций из полимерных композиционных материалов / А. М. Овсянкин, В. С. Еременко, Е. Ф. Суслев, А. В. Бохенко // Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів. — Вип. 11: Електромагнітний, ультразвуковий та оптичний неруйнівний контроль / Збірн. наук. праць; ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ. — Львів, 2006. — С. 56–59.

Нац. авиац. ун-т, Киев

Поступила в редакцию  
06.09.2006



## Уважаемые коллеги!

НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона» 16–19 апреля (г. Киев) приглашает принять участие в работе широкомасштабного выставочного форума «**Промышленные выставки — 2007**», на которых будут представлены достижения науки и производства в области сварки и родственных технологий, неразрушающего контроля и технической диагностики, антикоррозионной защиты металлоконструкций, обеспечения надежной эксплуатации и строительства ответственных конструкций, включая трубопроводные системы транспортировки нефти, газа, пара и воды, промышленной экологии и охраны труда.

### Заявки на участие в выставке высылать устроителю выставок:

ООО «Центр трансфера технологий «ИЭС им. Е. О. Патона, 03150, г. Киев, ул. Горького, 66, тел./факс: (044) 200 80 91, 200 80 89; 287 12 38; sv@ntk.in.ua

Украинский информационный центр «НАУКА.ТЕХНИКА.ТЕХНОЛОГИЯ» осуществляет информационную поддержку выставки и проводит в рамках выставки семинары «**Сварка и родственные технологии**», «**Промышленная экология**».

### Заявки на участие в семинаре направлять по адресу:

02094, Киев, а/я 41, УИЦ «НТТ», тел./факс: (044) 573 30 40, моб. 067-708 93 95; office@conference.kiev.ua

Ассоциация «ОКО» и НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» при поддержке УО НКД, НАЭК «Энергоатом» в рамках выставки приглашают Вас принять участие в **9-й конференции-выставке «Неразрушающий контроль-2007»**, которая состоится **16–19 апреля 2007 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза», г. Киев, ул. Салютная, 2, б.**

Заявки на участие направлять в Оргкомитет. Тел.: (044) 531 37 36, <http://ndt.com.ua>