

## **Энергоемкость деформирования до разрушения заземленной по круговому контуру тонкой пластины при ударном нагружении\***

**Г. В. Степанов<sup>а</sup>, В. И. Зубов<sup>а</sup>, А. Н. Олисов<sup>а</sup>, Я. Р. Клепачко<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Лаборатория физики и механики материалов, Метц, Франция

*Кратко описана экспериментальная методика оценки энергии, затраченной на разрушение тонколистового элемента конструкции с круговым контуром заземления при поперечном прогибе, вызванном ударным нагружением тела со сферической поверхностью. Приведены результаты испытаний на прогиб двух тонколистовых металлов (мягкая сталь и алюминиевый сплав Д16Т толщиной 1,0 и 0,75 мм соответственно) и ударостойкого композиционного материала РА6 толщиной 2,0 мм. Анализ экспериментальных данных и расчет напряженно-деформированного состояния материала пластины в пределах кругового контура заземления при прогибе позволили установить зависимость работы деформирования от характеристик динамической прочности и пластичности. Дана сравнительная оценка материалов тонколистовых элементов конструкций по энергоемкости их разрушения при поперечном статическом и ударном нагружении.*

**Ключевые слова:** тонкая пластина, прогиб, энергоемкость, ударное нагружение, разрушение, прочность.

**Введение.** Для изготовления тонколистовых корпусных элементов транспортных средств широко используются металлические и композиционные материалы. Деформирование тонколистового элемента конструкции под действием поперечной динамической нагрузки – сложный процесс, при котором развитие во времени нестационарного напряженно-деформированного состояния происходит в условиях неупругого деформирования материала и его разрушения. Для выбора технологии изготовления наиболее эффективного (по стойкости при динамическом нагружении) материала тонколистового элемента конструкции из выпускаемых промышленностью или новых материалов (в частности, композиционных) необходимо располагать экспериментальными данными, позволяющими сравнить материалы по величине возможного поглощения энергии, затраченной на их деформирование (разрушение) при поперечном ударном нагружении.

Представляется перспективным сравнение различных конструкционных материалов по удельной энергоемкости их деформирования при поперечном прогибе вплоть до разрушения (при плоском напряженном состоянии или близком к нему) с использованием данных испытаний на поперечный прогиб тонких пластин, заземленных по круговому контуру. Такая методика применима при статическом и динамическом нагружении. Идентичность образцов и схем их нагружения обеспечивает надежное сопоставление величин энергопоглощения различных материалов при ударном нагружении, если длительность нагружения достаточна для завершения нестационарных процессов в пластине (при такой длительности влиянием волновых процессов в пластине можно пренебречь).

\* Работа выполнена по программе INTAS-96-2141.

В данном сообщении приведены результаты испытаний на прогиб тонких пластин из мягкой стали 20, алюминиевого сплава Д16Т и композиционного материала РА6 с высокомодульными волокнами, предоставленного Институтом композиционных материалов (Кайзерслаутерн, Германия).

Испытания и анализ результатов проводили по методикам, аналогичным использованным ранее при изучении прогиба тонких пластин (мембран) с различным контуром заземления при действии кратковременного поперечного давления [1–3].

Влияние характеристик динамической прочности материалов, чувствительных к скорости деформации [4–6], на энергоемкость деформирования пластин при прогибе анализировали по результатам численного моделирования методом конечных элементов.

**Методики испытаний.** *Испытания на ударный прогиб тонколистовых элементов конструкций.* Для испытаний использовали пластины (образцы) в виде квадратов  $70 \times 70$  мм, вырезанных из листа. Схема ударного нагружения показана на рис. 1. Образец 3 зажимался между плоскими поверхностями верхнего и нижнего фланцев 4 и нагружался перемещением промежуточного цилиндрического стержня 1 со сферической головной частью. Нагрузку на пластину при ударном нагружении определяли по упругой деформации динамометра (цилиндрической части опоры 2). Деформацию регистрировали проволочными тензодатчиками 6, наклеенными на наружной цилиндрической поверхности динамометра – опоры 2, расположенной на основании 5.

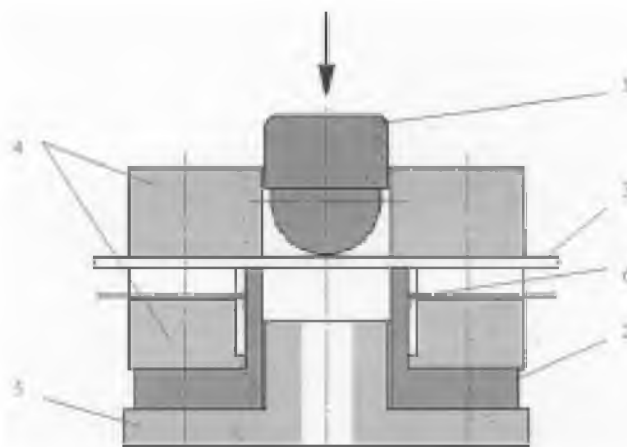


Рис. 1. Схема нагружения пластины при испытаниях на прогиб при статическом и ударном нагружении.

Испытания при статическом нагружении проводили на стандартной испытательной машине ИР 5047-50 с графической записью диаграмм нагрузка  $P$  – время  $t$  и упругая продольная деформация  $\varepsilon_d$  динамометра – время  $t$ .

Диаграмму деформация  $\varepsilon_d$  динамометра – время  $t$  при ударном нагружении записывали в блок памяти цифрового осциллографа, которую затем обрабатывали с использованием пакета прикладных программ EXCEL-97. Методика обработки диаграмм аналогична приведенной ранее [5].

Испытания на прогиб при ударном нагружении со скоростью до  $v_0 = 5$  м/с проводили на вертикальном копре [4]. Нагрузку на пластину создавали ударом по промежуточному стержню через демпфирующий элемент (прокладка из меди толщиной порядка 2,0 мм, необходимая для снижения возможного влияния отскока) свободно падающим тяжелым грузом. При испытаниях со скоростью до  $v_0 = 100$  м/с по промежуточному стержню ударяли бойком, который разгоняли по каналу ствола калибром 64 мм пневматического копра до требуемой скорости давлением сжатого газа. Схема регистрации диаграммы упругая деформация динамометра  $\varepsilon_d$  – время  $t$  идентична использованной при статическом нагружении.

При выбранных размерах динамометра из закаленной стали (высота цилиндрической части  $l_d = 12,5$  мм) в нем обеспечивается близкое к однородному напряженно-деформированное состояние при длительности нарастания нагрузки  $t_l \gg 2l_d / c_0 \approx 5$  мкс ( $c_0$  – скорость распространения упругой продольной волны в динамометре), что выполнялось в проведенных испытаниях. Волновые процессы в деформируемой части пластины диаметром  $d = 40$  мм в процессе поперечного прогиба при ударном нагружении вызывают нестационарное напряженно-деформированное состояние, отличием которого от квазистатического можно пренебречь при длительности роста нагрузки  $t_l \gg d / c_t \approx 20$  мкс ( $c_t$  – радиальная скорость распространения волны деформаций сдвига). В упруговязкопластичном материале скорость распространения пластических деформаций понижается с повышением деформации, особенно при локализации деформации [4], что увеличивает начальный период нестационарного деформирования пластины при прогибе. Отклонение нестационарного напряженно-деформированного состояния в пластине от квазистатического к моменту разрушения возрастает при повышении скорости прогиба. В проведенных исследованиях ввиду большой длительности нарастания нагрузки до максимальной величины во всех экспериментах ( $> 200$  мкс) отклонение напряженно-деформированного состояния от квазистатического при максимальной нагрузке незначительное и при анализе экспериментальных данных не учитывалось.

Поперечную нагрузку  $P$  на пластину рассчитывали по регистрируемой диаграмме  $\varepsilon_d - t$  с использованием тарировочной зависимости, определенной по результатам специальных экспериментов при статическом нагружении и проверочных экспериментов при ударном нагружении.

*Построение тарировочной зависимости.* Поперечную нагрузку  $P$  на пластину рассчитывали по регистрируемой деформации динамометра  $\varepsilon_d$  с помощью линейной зависимости

$$P = k \varepsilon_d, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, определенный по результатам испытаний на прогиб при статическом нагружении.

Коэффициент пропорциональности  $k$  определяли путем линейной аппроксимации зависимости нагрузки  $P$ , регистрируемой системой измерения нагрузки испытательной машины, от деформации динамометра  $\varepsilon_d$ , регистрируемой тензодатчиками, которые наклеены на его цилиндрической поверхности.

По результатам тарировочных экспериментов линейные зависимости, полученные при статическом прогибе пластин из тонколистового металла и композиционного материала, не совпадают. Это может быть вызвано различной изгибной жесткостью, влияющей на напряженное состояние в пластине вблизи ее поверхности контакта с динамометром и давление на поверхности контакта пластины с динамометром. Для учета указанного отличия расчет усилия на пластину при ударном нагружении выполняли с использованием тарировочных зависимостей, полученных при статическом нагружении для соответствующего материала.

Применимость единой тарировочной зависимости при статическом и ударном нагружении со скоростью 5 м/с подтверждена в результате сопоставления изменения кинетической энергии нагружающей массы и работы деформирования пластины при прогибе. При начальной кинетической энергии нагружающей массы, недостаточной для разрушения пластины, вся энергия расходуется на деформирование (в конечной стадии прогиба скорость этой массы снижается до нуля). Следовательно, начальная кинетическая энергия  $K$ , определяемая начальной скоростью  $v_0$  совместного движения нагружающего тела и передающего стержня при условии их неупругого взаимодействия, и работа деформирования пластины  $A$  равны.

При тарировочных испытаниях на вертикальном копре скорость удара рассчитывали по высоте падения  $H$  нагружающей массы:  $v_0 = \sqrt{2gH}$ . Из условия неупругого соударения нагружающей массы  $M$  и промежуточного стержня массой  $m$  скорость прогиба  $v$  и кинетическая энергия  $K$  определяются по формулам

$$v = v_0 \frac{M}{m + M}; \quad K = \frac{1}{2} v^2 \frac{M^2}{m + M}. \quad (2)$$

Для одного из экспериментов на рис. 2 представлены исходная диаграмма деформация динамометра  $\varepsilon_d$  – время  $t$  при ударном прогибе пластины из стали и кривые, рассчитанные по тарировочной зависимости, полученной при статическом нагружении такой пластины.

Равенство работы деформирования пластины при ударном прогибе и исходной кинетической энергии нагружающей массы подтверждает применимость тарировочной зависимости (1), определенной при статическом нагружении, для расчета нагрузки при статическом и ударном нагружении.

Работу деформирования пластины при прогибе с учетом уменьшения скорости последнего до нуля определяли по методике, приведенной ниже.

*Расчет работы деформирования пластины с учетом снижения скорости в процессе увеличения прогиба.* Принимая скорость перемещения нагружающей массы равной скорости ее центра тяжести, т.е. пренебрегая волновыми процессами во взаимодействующих телах, замедление массы определяется усилием  $P$  на пластину при прогибе:

$$a(t) = dv / dt = P(t) / M; \quad P(t) = k \varepsilon_d(t). \quad (3)$$

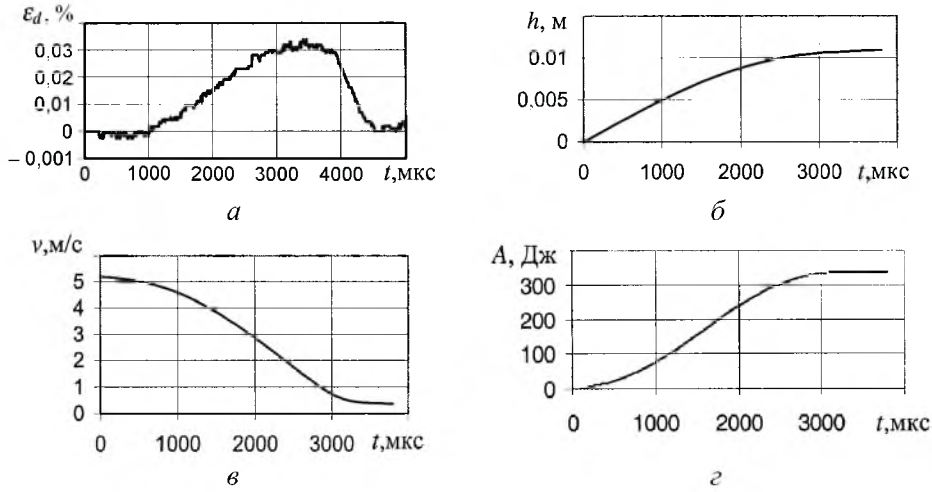


Рис. 2. Исходная (а) и расчетные (б-г) зависимости тарировочного эксперимента при ударном нагружении: а – деформация динамометра  $\varepsilon_d$  – время  $t$ ; б – прогиб  $h$  – время  $t$ ; в – скорость прогиба  $v$  – время  $t$ ; г – работа деформирования  $A$  – время  $t$ .

Текущие скорость  $v(t)$ , прогиб  $h(t)$  и работа деформирования пластины  $A(t)$  при заданной диаграмме нагрузка  $P$  – время  $t$  определяются по формулам

$$v(t) = v_0 - \int_0^t [P(t) / M] dt; \quad h(t) = \int_0^t v(t) dt; \quad A(t) = \frac{1}{2} M [v_0^2 - v^2(t)]. \quad (4)$$

Изменение параметров прогиба с течением времени получено численным интегрированием.

**Результаты испытаний и их анализ.** Характерные диаграммы деформация динамометра  $\varepsilon_d$  – время  $t$  при статическом и ударном нагружении приведены на рис. 3, результаты испытаний и расчетные характеристики энергоемкости испытуемых материалов – в таблице.

**Основные результаты испытаний пластин на прогиб**

Материал	$\delta$ , мм	$v_0$ , м/с	$v$ , м/с	$P_{\max}$ , кН	$A_m$ , кДж/кг
Мягкая сталь	1,0	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	27,14	15,95
		4,95	4,84	35,05	20,65
		140	40,8	38,40	30,72
Сплав Д16Т	0,75	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	15,18	23,02
		4,95	4,68	13,47	19,32
		132	27,4	14,10	15,73
Композиционный материал РА6	2,0	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	24,39	36,41
		4,95	4,68	9,49	10,67
		146	30,3	9,02	8,73

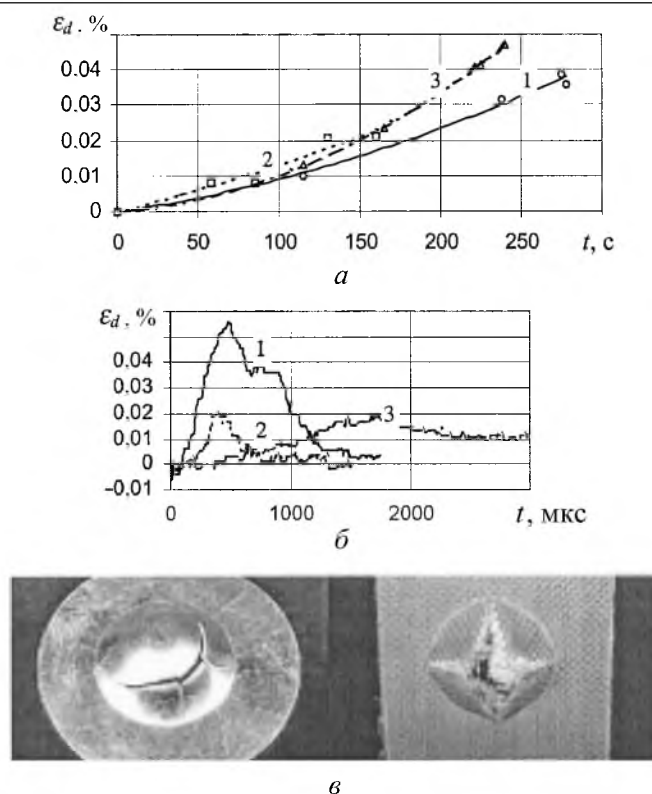


Рис. 3. Характерные диаграммы деформация динамометра  $\varepsilon_d$  – время  $t$  и вид разрушения тонких пластин при прогибе:  $a$  – статическое нагружение;  $b$  – динамическое нагружение ( $1 - v \approx 40$  м/с,  $2 - v \approx 30$  м/с,  $3 - v \approx 30$  м/с);  $c$  – характерный вид разрушения в результате прогиба при ударном нагружении пластин из алюминиевого сплава Д16Т ( $v \approx 30$  м/с) – слева и композиционного материала РА6 ( $v \approx 30$  м/с) – справа. (Сплошные линии – мягкая сталь; штриховые – алюминиевый сплав Д16Т; штрихпунктирные – композиционный материал РА6.)

*Квазистатическое нагружение композиционного материала.* При статическом нагружении образца диаграмма деформация динамометра – время характеризуется монотонным ростом нагрузки во времени до максимальной величины и ее последующим быстрым спадом вследствие возникновения начального участка разрушения и его развития. Принимая скорость движения нагружающего стержня  $v$  постоянной и пренебрегая упругими деформациями элементов машины, регистрируемую диаграмму нагрузка  $P$  – время  $t$  можно рассматривать как диаграмму нагрузка  $P$  – прогиб  $h$  с измененным масштабом по оси абсцисс. Полная  $A$  и удельная  $A_m$  (на единицу массы испытываемого материала) работа деформирования и разрушения испытываемого образца при прогибе определяется следующим образом:

$$A = \int P dh = \int P(t) v dt; \quad A_m = A / (\pi D^2 \rho \delta / 4), \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина пластины;  $\rho$  – плотность испытываемого материала;  $D$  – диаметр контура заземления.

Удельная работа деформирования и разрушения  $A_m$  характеризует энергоемкость материала и может быть использована для сравнения различных материалов тонколистовых элементов конструкций.

При прогибе пластины из композиционного материала ее наружный контур (первоначально прямолинейный) искривляется вследствие утяжки материала в область прогиба, что свидетельствует о деформации сдвига вдоль направления волокон. Сохранение остаточной деформации сдвига и прогиба пластины после разгрузки говорит о значительной пластической деформации сдвига в плоскости пластины из композиционного материала в условиях прогиба.

Согласно результатам испытаний композиционного материала на растяжение, в нем не наблюдаются заметные остаточные деформации вдоль волокон, следовательно, возникновение остаточных деформаций при прогибе пластины обусловлено относительным смещением волокон. Такой вывод следует из анализа удлинения средней линии в поперечном сечении пластины после нагружения.

Изменение длины волокна  $\Delta l$  вдоль его искривленной при прогибе линии в области прогиба диаметром  $D_m$  при стреле прогиба  $h$  примерно равно

$$\Delta l = \frac{8}{3} \left( \frac{h}{D_m} \right)^2 D_m. \quad (6)$$

Значение  $\Delta l$ , рассчитанное по формуле (6) при  $h = 6,5$  мм,  $D_m = 40$  мм, составляет 2,82 мм, что близко к измеренному значению. Значит, остаточное изменение длины волокна в композиционном материале при поперечном прогибе пластины мало, а остаточная деформация вызвана относительным сдвигом волокон.

Усредненная величина деформации сдвига вдоль волокон в пластине со стороны квадрата длиной  $L$  ( $L = 70$  мм)  $\gamma_m = \Delta l / L > 4\%$ , что значительно выше максимальных значений продольной упругой деформации вдоль волокон, определенной по результатам испытаний на растяжение. Эти данные свидетельствуют о существенных остаточных деформациях сдвига в испытанном композиционном материале и их значимом влиянии на энергоемкость разрушения при поперечном прогибе под действием статического нагружения.

Разрушение пластины при прогибе возникает вблизи ее центра и развивается в виде узких областей разрушения, ориентированных поперек волокон, т.е. начало разрушения определяется исчерпанием возможности продольного деформирования волокон вблизи центра (рис. 3).

*Ударное нагружение композиционного материала.* При ударном нагружении со скоростью около 5 м/с, как и при статическом, регистрируемая диаграмма  $\varepsilon_d - t$  свидетельствует о близком к линейному повышению нагрузки во времени до максимальной величины. С использованием значений начальной скорости прогиба, скорости общего движения соударяющихся тел (2) и диаграммы нагрузка–время по уравнениям (3) рассчитано изменение

удельной работы деформирования пластины (5) в зависимости от прогиба (перемещения нагружающего стержня) – рис. 4. При ударном нагружении к моменту достижения максимальной нагрузки (началу разрушения) удельная работа деформирования примерно в три раза ниже, чем при статическом.

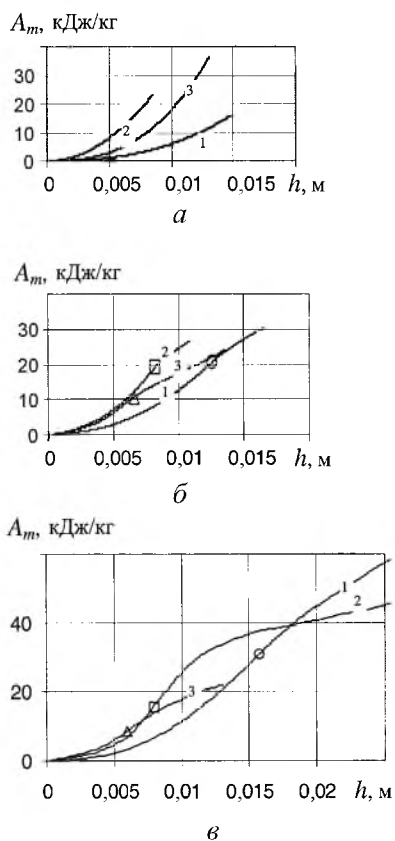


Рис. 4. Расчетные зависимости удельной энергии разрушения  $A_m$  от прогиба  $h$  при статическом (а) и ударном (б, в) нагружении со скоростью  $v = 5$  и  $40$  м/с соответственно пластин из мягкой стали (1), алюминиевого сплава Д16Т (2) и композиционного материала РА6 (3). (Точки – максимальные уровни нагрузки при ударном нагружении.)

При ударном нагружении со скоростью  $v \approx 40$  м/с на начальном участке диаграммы нагрузка – время имеют место колебания, вызванные, по-видимому, волновыми процессами в деформированной области пластины. К моменту начала разрушения максимальная нагрузка и работа разрушения близки к таковым при скорости  $\approx 5$  м/с.

Линейность наружного контура пластины при ее прогибе под действием ударной нагрузки сохраняется в отличие от деформирования при статическом нагружении. Следовательно, возможные сдвиговые деформации вдоль волокон ограничены областью материала в пределах наружной границы контура заземления. Отсутствие видимых деформаций сдвига на контуре пластины может быть обусловлено повышением сопротивления связующего сдвигу при данной скорости деформации (кратковременность нагружения).



Разрушение пластины, как и при прогибе под действием статической нагрузки, возникает вблизи центра и развивается в виде четырех лучей (узких полос разрушенного материала), ориентированных поперек волокон (рис. 3,в). На наружной поверхности пластины в области прогиба мембранные напряжения растяжения суммируются с растягивающими напряжениями, возникшими вследствие изгиба. Поэтому разрушение инициируется вблизи центра на наружной поверхности пластины, а его развитие сопровождается продвижением полосы разрушения в радиальном направлении, расслоением материала по толщине и разрыхлением – нарушением связи волокон со связующим в полосе общей шириной около 3-4 мм. Ширина области разрыхления при ударном нагружении заметно шире, чем при статическом. При дальнейшем увеличении прогиба вблизи контура заземления наблюдается дополнительное разрушение вследствие изгиба.

Для сопоставления энергоемкости деформирования материалов до разрушения при прогибе и одноосном напряженном состоянии предположим, что критическое состояние материала, соответствующее разрушению, достигается при максимальной деформации волокон, равной при одноосном напряженном состоянии  $\varepsilon_{\max}$ . В центральной части упругодеформируемой пластины удельная энергия упругой деформации материала к моменту достижения критической деформации волокон с учетом равенства напряжений в двух направлениях срединной плоскости равна

$$A_{mp} = E\varepsilon_{\max}^2 / \rho. \quad (7)$$

На удалении от центра пластины деформации в двух направлениях не равны, а работа упругого деформирования материала понижена. Поэтому определенное по выражению (7) значение работы упругой деформации материала является максимальным (без учета деформаций сдвига).

Согласно экспериментальным данным, полученным при статическом нагружении композиционного материала РА6 (принимая  $E = 23,2$  ГПа,  $\varepsilon_{\max} = 0,014$ ,  $\rho = 1270$  кг/м<sup>3</sup> по результатам испытаний на растяжение [6]),  $A_{mp} \approx 3,5$  кДж/кг. Эта величина значительно меньше значения, рассчитанного по диаграмме усилие – прогиб при статическом ( $A_m > 36$  кДж/кг) и ударном ( $A_m \approx 8...10$  кДж/кг) нагружении. Такое несоответствие может быть обусловлено включением в процесс деформирования при прогибе дополнительного объема материала вне внутреннего контура заземления, а также дополнительной работой напряжений сдвига в объеме деформированного материала и работой повреждения и разрушения материала. Определение вклада этих составляющих требует проведения дополнительных исследований.

Сопоставление диаграмм  $\varepsilon_d - t$  при статическом и ударном нагружении показывает, что с повышением скорости ударного нагружения уровень максимальной нагрузки на пластину из РА6 уменьшается примерно в 2,5 раза. Снижение остаточных деформаций сдвига вдоль волокон при ударном нагружении пластины приводит к тому, что основная часть работы сил давления на пластину идет на деформирование и разрушение материала в области, ограниченной контуром заземления.

Для сравнения энергоемкости различных материалов при прогибе проведены испытания на поперечный прогиб пластин из мягкой стали и алюминиевого сплава Д16Т (рис. 4). Результаты испытаний свидетельствуют о том, что разрушению предшествует локализация деформации (утонение материала) вблизи круговой границы контакта пластины со сферической поверхностью нагружающего стержня (рис. 3,в).

Из сопоставления данных по удельной энергоемкости деформирования до разрушения (до момента достижения максимальной нагрузки) при статическом нагружении следует, что композиционный материал имеет преимущество перед высокопрочным алюминиевым сплавом и мягкой сталью (рис. 4,а). При равных прогибах (до возникновения разрушения) удельная энергоемкость деформирования алюминиевого сплава максимальна.

При переходе от статического нагружения к ударному со скоростью  $v \approx 5$  м/с удельная работа разрушения стали и алюминиевого сплава изменяется незначительно, в то время как для композиционного материала она существенно снижается. Однако при равных прогибах (до возникновения разрушения) энергоемкости деформирования алюминиевого сплава и композиционного материала практически равны, но существенно выше, чем для мягкой стали.

С дальнейшим повышением скорости ударного нагружения до  $v \approx 40$  м/с удельная работа деформирования пластин из композиционного материала и алюминиевого сплава, характеристики прочности которых малочувствительны к скорости деформации, практически не изменяется, а энергоемкость деформирования до разрушения мягкой стали, чувствительной к скорости деформации, повышается.

**Компьютерное моделирование напряженного состояния в пластине при ударном нагружении.** Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине, заземленной по круговому контуру, при поперечном прогибе, вызванном перемещением стержня со сферической головной частью с постоянной скоростью, проводили методом конечных элементов. Для расчетов использовали пакет прикладных программ ИМПРО [7]. Поведение материала описывали упруговязкопластической моделью.

Неоднородность поля деформаций в пластине толщиной 2 мм (при  $\sigma_T = 400$  МПа,  $\rho = 1270$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 23,2$  ГПа, соответствующих композиционному материалу РА6) обусловлена влиянием мембранных напряжений растяжения и напряжений, вызванных изгибом (рис. 5,а). Соотношение этих напряжений определяется величиной прогиба и толщиной пластины. Максимальная деформация и напряженность вблизи центра возрастают с течением времени примерно пропорционально величине прогиба. Причем в кольцевой области пластины шириной около 10 мм, прилегающей к контуру заземления диаметром  $2r = 40$  мм, интенсивность деформаций намного ниже, чем в ее центральной части.

Максимальные деформации растяжения возникают вблизи центра деформированной части пластины. В этой области при прогибе пластин из композиционного материала РА6 начинается разрушение по двум направлениям, перпендикулярным к направлению волокон. Такое разрушение может быть вызвано достижением критической деформации вдоль волокон.

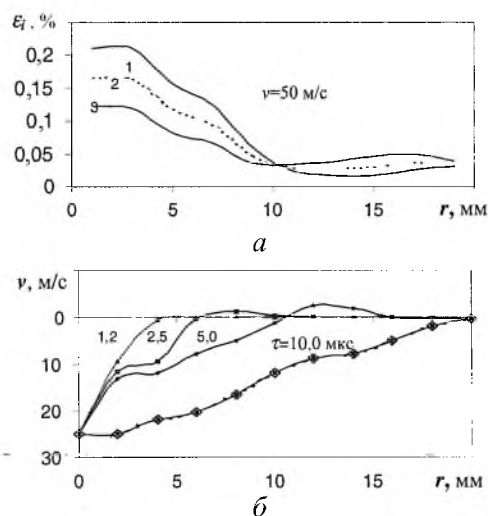


Рис. 5. Распределение интенсивности деформаций вдоль радиуса в пластине при ее прогибе вблизи наружной (1), срединной (2) и внутренней (3) поверхности через 90 мкс после начала нагружения (а) и осевой скорости материала пластины ( $v \approx 25$  м/с) по радиусу в различные моменты времени (б) при поперечном нагружении движением жесткой сферы.

В начальный период действия поперечной нагрузки в пластине возникает нестационарное напряженное состояние, обусловленное распространением волн напряжений от центра к границе контура заземления. Это хорошо видно из сравнения распределений скорости вдоль радиуса деформированной области пластины в различные моменты времени (рис. 5, б). Нелинейный характер начального участка диаграммы нагрузка–время, зарегистрированной в экспериментах при ударном нагружении пластин из РА6 со скоростью  $v \approx 30$  м/с, может быть обусловлен указанными волновыми процессами в пластине. Согласно результатам расчетов, при длительности более 25 мкс распределение поперечной скорости вдоль радиуса деформированной области пластины приближается к стационарному состоянию.

В тонколистовом металлическом элементе конструкции разрушение возникает на удалении от оси, вблизи границы контакта сферического тела с пластиной, и ему предшествует локализованное утонение. Это свидетельствует о том, что разрушение при прогибе определяется не столько интенсивностью пластической деформации (максимальна вблизи центра), сколько реальным напряженно-деформированным состоянием.

**Заключение.** Испытание на поперечный прогиб тонких пластин, заземленных по контуру, позволяет дать сравнительную оценку удельной энергоемкости деформирования до разрушения различных материалов при статическом и ударном нагружении.

Удельная работа деформирования пластин до разрушения при поперечном прогибе под действием статической нагрузки для композиционного материала максимальна, для алюминиевого сплава Д16Т она ниже и для мягкой стали еще ниже. При равной величине прогиба максимальная энергоемкость деформирования характерна для алюминиевого сплава, для стали она минимальна.

Значения удельной работы деформирования пластин при ударном прогибе до заданной величины (в отсутствие разрушения) для испытуемого композиционного материала РА6 и алюминиевого сплава Д16Т почти равны, но значительно выше, чем для стали.

С ростом скорости прогиба работа деформирования до разрушения алюминиевого сплава Д16Т и композиционного материала РА6 снижается, стали – повышается.

## Резюме

Коротко викладено експериментальну методику оцінки енергії, що витрачається на руйнування тонкої пластини з круговим контуром защемлення, при поперечному прогині внаслідок ударного навантаження тіла з сферичною поверхнею. Наведено результати досліджень на прогин двох листових металів (м'яка сталь та алюмінієвий сплав Д16Т товщиною 1,0 та 0,75 мм відповідно) та ударостійкого композиційного матеріалу РА6 товщиною 2,0 мм. Аналіз експериментальних даних і розрахунків напружено-деформованого стану матеріалу пластини в межах кругового контуру защемлення при прогині дозволив встановити залежність роботи деформування від характеристик динамічної міцності та пластичності. Представлена порівняльна оцінка тонколистових матеріалів за енергоемністю руйнування при поперечному статичному та ударному навантаженні.

1. Степанов Г. В., Мальцев В. А., Коваленко А. В. Прогиб металлических пластин под действием нагрузки, вызванной взрывом заряда ВВ // Пробл. прочности. – 1988. – № 2. – С. 112 – 114.
2. Степанов Г. В., Коваленко А. В. Неупругий прогиб круглой пластины локальным импульсом давления // Там же. – № 4. – С. 29 – 31.
3. Степанов Г. В., Демченко А. М. Динамический прогиб заземленных по контуру тонколистовых элементов конструкций при взрывном нагружении // Там же. – 1993. – № 4. – С. 94 – 96.
4. Степанов Г. В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.
5. Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Токарев В. М. Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 62 – 69.
6. Степанов Г. В., Зубов В. И., Токарев В. М. и др. Прочность тонколистового элемента конструкции из композиционного материала при ударном растяжении // Там же. – 2001. – № 1. – С. 36 – 46.
7. Харченко В. В. Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом эффектов вязкопластичности. – Киев: Логос, 1999. – 280 с.

Поступила 24. 02. 2000