

Испытание материалов тонколистовых элементов конструкций на поперечный сдвиг*

Г. В. Степанов^а, В. И. Зубов^а, А. Н. Олисов^а, Я. Р. Клепачко^б

^а Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

^б Лаборатория физики и механики материалов, Метц, Франция

Кратко описана экспериментальная методика оценки энергии, затраченной на разрушение тонкой пластины с круговым контуром зацебления при поперечном сдвиге, вызванном ударным нагружением тела с плоским торцом. Приведены результаты испытаний образцов двух металлических материалов (мягкая сталь толщиной $\delta = 1,0$ мм и алюминиевый сплав Д16Т, $\delta = 0,75$ мм) и ударостойкого композиционного материала РА6, $\delta = 2,0$ мм. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных напряженно-деформированного состояния материалов (в пределах кольцевой области между круговыми контурами зацебления и поверхности нагружения) показана качественная связь энергоемкости разрушения с характеристиками динамической прочности и пластичности. Результаты испытаний позволяют сравнить различные материалы по энергоемкости их разрушения при ударном нагружении. Удельная работа деформирования при сдвиге полнее характеризует энергоемкость разрушения, чем определенная при прогибе, вызванном движением тела со сферической поверхностью, и применима в расширенном диапазоне скоростей ударного нагружения.

Ключевые слова: тонкая пластина, поперечный сдвиг, энергоемкость, разрушение, ударное нагружение, прочность.

Введение. При изготовлении тонколистовых корпусных элементов транспортнх средств широко используются металлические и композиционные материалы. Для выбора наиболее эффективного материала и технологии его изготовления из перечня выпускаемых промышленностью, а также надежной оценки прочности материалов (в частности, композиционных) при ударном нагружении необходимо располагать экспериментальными данными, позволяющими сопоставить различные материалы по величине возможного поглощения энергии, затрачиваемой на деформирование (разрушение) при таком нагружении.

Сопоставление различных материалов по интегральной энергоемкости их деформирования, вызванного поперечным перемещением жесткого тела с плоским торцом, позволяет оценить эффективность энергопоглощения материала в условиях, соответствующих сдвигу. Существенно нестационарное напряженно-деформированное состояние и волновые процессы в деформируемой части листового элемента при высокой скорости сдвига затрудняют анализ процесса деформирования и ограничивают применимость такого сопоставления диапазоном умеренных скоростей сдвига. Снижение эффектов, вызванных нестационарностью напряженного состояния и волновыми процессами, при ограничении объема деформированного материала кольцевой областью позволяет использовать результаты экспериментов для сравнительной оценки энергоемкости деформирования материалов в широком диапазоне скоростей ударного нагружения.

* Работа выполнена по программе INTAS-96-2141.

В данном сообщении приведены результаты испытаний на сдвиг при статическом и ударном нагружении тонких пластин из мягкой стали, алюминиевого сплава Д16Т и композиционного материала РА6, изготовленного Институтом композиционных материалов (Германия).

Образцы и методики испытаний аналогичны использованным ранее [1–3] для изучения прогиба тонких пластин (мембран) с различным контуром защемления при действии кратковременного давления.

Качественная связь между энергоемкостью при сдвиге и характеристиками динамической прочности испытанных материалов проанализирована с использованием результатов численного моделирования динамического сдвига тонкой пластины и результатов испытаний материалов на растяжение [4, 5].

Методики испытаний. Усилия сдвига регистрировали по схеме нагружения, аналогичной использованной при испытаниях на прогиб [3].

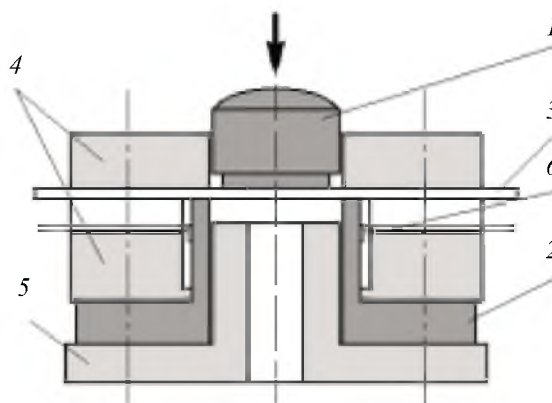


Рис. 1. Схема нагружения пластины при испытаниях на сдвиг.

Объектом испытаний на ударный сдвиг конструкционных материалов служили пластины (образцы) в виде квадратов 70×70 мм, вырезанные из листа. Схема ударного нагружения пластины показана на рис. 1. Образец 3 зажимали между плоскими поверхностями верхнего и нижнего фланцев 4 и нагружали перемещением промежуточного цилиндрического пуансона (ударника) 1 с плоским торцом. Различие диаметров пуансона и цилиндрической части опоры 2 (динамометра) определяет ширину кольцевой области пластины ($\Delta r = (D_m - D_r) / 2$), в которой материал подвергается значительной деформации сдвига (напряженно-деформированное состояние в кольцевой области является трехосным, однако превалирует деформация сдвига). Усредненная по объему деформация сдвига γ и средняя скорость деформации сдвига γ' ($\gamma' = v / \Delta r$) при заданной скорости v движения пуансона и его смещении Δx к моменту разрушения позволяют определить предельную деформацию γ_f :

$$\gamma_f = \Delta x / \Delta r. \quad (1)$$

Нагрузку на пластину при ударном нагружении находили по упругой деформации динамометра. Деформацию регистрировали с использованием проволочных тензодатчиков 6, наклеенных на наружной поверхности цилиндра-динамометра 2, расположенного на основании 5.

Испытания при статическом нагружении проводили на стандартной испытательной машине ИР 5047-50 с графической записью диаграмм нагрузка P – время t и диаграмм деформация в динамометрической части опоры ε_d – время t . Последнюю диаграмму записывали в блок памяти цифрового осциллографа и в дальнейшем обрабатывали с использованием пакета прикладных программ EXCEL-97. Схема обработки зарегистрированных диаграмм аналогична приведенной в работе [3].

При выбранных размерах динамометра (высота кольцевой части $l = 12,5$ мм) в нем обеспечивается близкое к однородному напряженно-деформированное состояние при длительности нарастания нагрузки $t_1 \gg 2l / c_0 = 5$ мкс (c_0 – скорость распространения упругой продольной волны), что удовлетворено в проведенных испытаниях. Волновые процессы в кольцевой деформируемой сдвигом области пластины не могут оказать существенного влияния на ее напряженно-деформированное состояние. Ввиду большой длительности нарастания нагрузки до максимальной величины в проведенных испытаниях при ударном нагружении отклонение напряженно-деформированного состояния от квазистатического в деформируемой части пластины и в динамометре мало и при анализе экспериментальных данных не учитывалось.

При высокой скорости ударного нагружения использовали трубчатый динамометр с увеличенной длиной (100 мм), что позволяет регистрировать деформацию в прямой продольной волне в течение ≈ 40 мкс (до прихода к тензодатчику волны, отраженной от опорной поверхности динамометра).

Энергоемкость разрушения заземленной по круговому контуру тонкой пластины при ударном нагружении. При ударном нагружении со скоростью до 5 м/с испытания проводили на вертикальном копре [6]. Нагрузка на пластину создавалась ударом свободно падающей тяжелой массы. Для ударного сдвига со скоростью выше 10 м/с использовали удар по пуансону (промежуточный стержень) бойка, который разгоняли до требуемой скорости по каналу ствола (калибр 64 мм) пневматического копра [6]. Схема регистрации диаграммы упругая деформация динамометра ε_d – время t идентична использованной при статическом нагружении. Экспериментальная тарировка динамометра проведена по результатам статического нагружения пластин.

Характерные диаграммы нагрузка P – время t при статическом и ударном нагружении и результаты их анализа представлены на рис. 2 и в таблице.

Поперечную нагрузку P на пластину рассчитывали по регистрируемой деформации динамометра ε_d , где $P = k\varepsilon_d$ (k – коэффициент пропорциональности, определенный по калибровочной зависимости нагрузка–деформация, полученной при статическом нагружении и проверенной при ударном нагружении [3]).

Основные результаты испытаний пластин на сдвиг

Материал	Толщина δ , мм	Скорость нагружающей массы v_0 , м/с	Начальная скорость прогиба v , м/с	Максимальная нагрузка P_{max} , кН	Удельная работа деформирования и разрушения A_m , кДж/кг
Мягкая сталь	1,00	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	27,5	145,3
		4,95	4,89	28,2	25,4
		120	50,40	32,7	23,6
Сплав Д16Т	0,75	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	17,8	53,1
		4,93	4,86	14,8	21,1
		139	58,40	14,0	34,1
Композиционный материал РА6	2,00	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	32,4	141,9
		4,93	4,88	28,5	54,7
		108	45,10	21,0	38,4

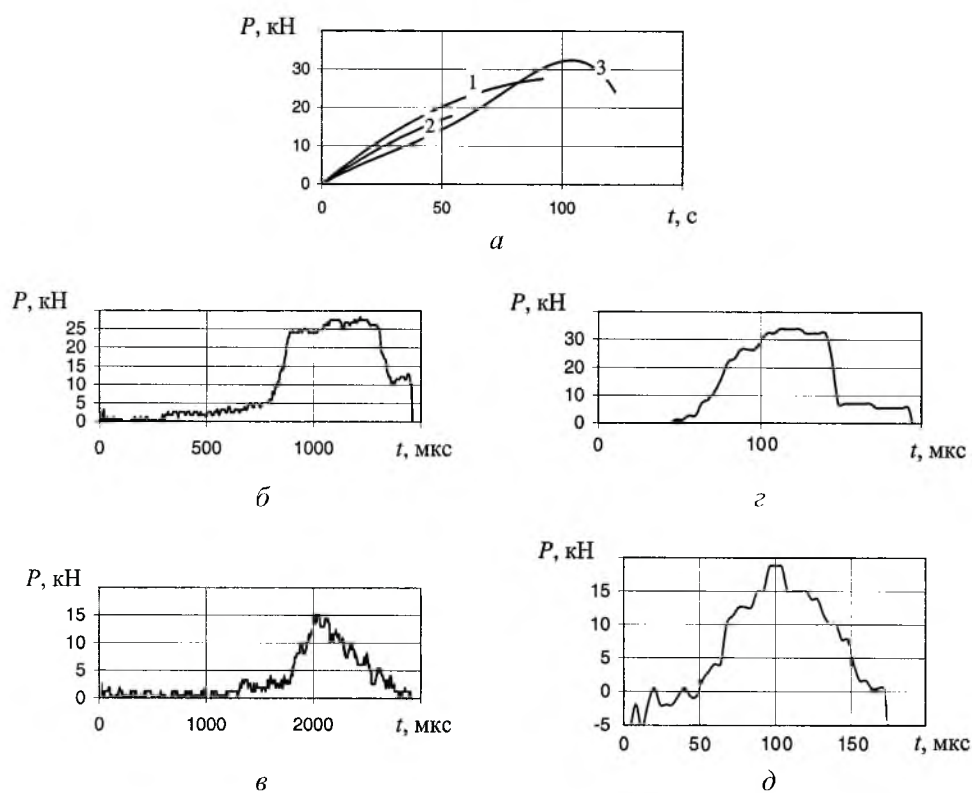


Рис. 2. Характерные диаграммы нагрузка P – время t : а – статическое (1 – мягкая сталь, 2 – алюминиевый сплав Д16Т, 3 – композиционный материал РА6); б, в – динамическое ($v \approx 5$ м/с), соответственно мягкая сталь, алюминиевый сплав Д16Т; г, д – то же ($v \approx 50$ м/с), соответственно мягкая сталь, композиционный материал РА6.

Анализ результатов испытаний. Квазистатическое нагружение. В этом случае диаграмма нагрузка–время (деформация–время) характеризуется монотонным ростом нагрузки во времени до максимальной величины и ее быстрым спадом при развитии разрушения (рис. 2).

Принимая скорость движения нагружающего стержня v постоянной (упругими деформациями элементов машины пренебрегаем), регистрируемую диаграмму нагрузка P – время t можно рассматривать как диаграмму нагрузка P – сдвиг (смещение) h с измененным масштабом по оси абсцисс. Полная A и удельная A_m (на единицу массы испытуемого материала) работа деформирования и разрушения материала при сдвиге определяется выражениями:

$$A = \int P dh; \quad (2)$$

$$A_m = \frac{A}{\rho \pi \delta (D^2 - d^2) / 4}, \quad (3)$$

где δ и ρ – толщина и плотность испытуемого материала; D и d – внутренний диаметр контура заземления и диаметр границы нагружения.

Удельная работа деформирования и разрушения A_m характеризует энергоемкость, что позволяет по этой характеристике сравнивать различные материалы при изготовлении тонколистовых элементов конструкций.

Ударное нагружение. При ударном нагружении регистрируемая диаграмма нагрузка P – время t (рис. 2) характеризует процесс роста поперечного сдвига центральной части материала пластины относительно заземленного контура со скоростью, равной скорости движения нагружающего пуансона v . При испытаниях на вертикальном копре начальную скорость сдвига рассчитывали по скорости падающей тяжелой массы непосредственно перед соударением: $v_0 = \sqrt{2gH}$, при испытаниях на пневматическом копре – по измеренной скорости бойка перед соударением v_0 .

Исходя из условия неупругого соударения бойка массой M с передающим стержнем массой m скорость сдвига

$$v = v_0 \frac{M}{m + M}.$$

Работу деформирования материала пластины при ударном нагружении определяли по ранее приведенной методике [3].

Разрушение композиционного материала сопровождается его расслоением и разрыхлением – нарушением связи волокон со связующим в кольцевой области интенсивных деформаций общей шириной около 2-3 мм.

На рис. 3 сопоставлены диаграммы нагрузка P – сдвиг h при статическом и динамическом нагружении испытуемых материалов. При сдвиге, вызванном ударным нагружением, уровень максимальной нагрузки выше для пластины из мягкой стали, а величина сдвига ниже, чем при статическом нагружении. Отличительной чертой поведения композиционного материала

РА6 является падение уровня максимальной нагрузки и величины сдвига при ударном (динамическом) нагружении. Снижение остаточных деформаций сдвига в области защемления свидетельствует, что основная часть работы сил давления на пластину при ударном нагружении затрачена на деформирование и разрушение материала в области, ограниченной контуром защемления.

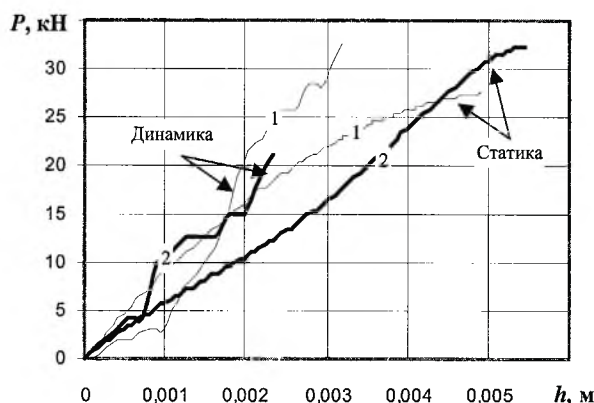


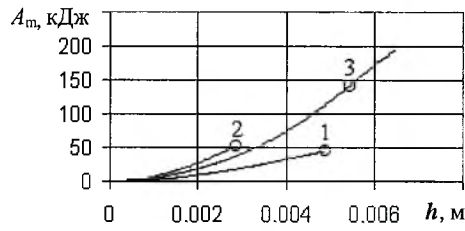
Рис. 3. Диаграммы нагрузка P – сдвиг h при статическом и динамическом ($v \approx 50$ м/с) нагружении мягкой стали (1) и композиционного материала РА6 (2).

Для сравнения энергоемкостей различных материалов при сдвиге проведены испытания на поперечный сдвиг пластин из листовой мягкой стали, алюминиевого сплава Д16Т и композиционного материала РА6. Основные результаты испытаний приведены в таблице.

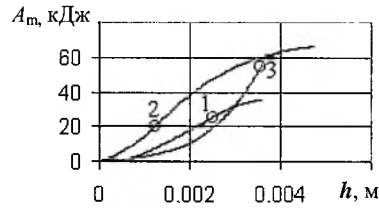
При статическом нагружении пластин из мягкой стали и алюминиевого сплава Д16Т нагрузка монотонно повышается до максимальной величины, по достижении которой следует быстрый ее спад, вызванный разрушением. В композиционном материале полному разрушению предшествует короткий участок спада нагрузки.

В случае ударного нагружения стальной пластины после быстрого подъема нагрузки следует участок пластического течения с малым изменением ее уровня (рис. 2, б, з), в то время как при ударном нагружении пластин из алюминиевого сплава со скоростью около 5 м/с после повышения нагрузки до максимальной величины наблюдается участок спада значительной длительности. При испытаниях с более высокой скоростью ударного нагружения этих материалов заметны осцилляции нагрузки на участках ее роста и спада.

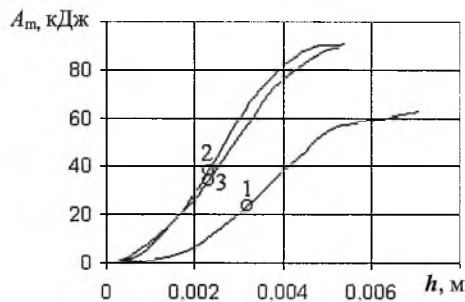
Изменение удельного поглощения энергии при деформировании материалов до разрушения в зависимости от поперечного смещения нагружающего стержня приведено на рис. 4. При статическом нагружении максимальная удельная энергия деформации имеет место непосредственно перед быстрым разрушением (на рис. 4, а кривые 1–3). Как видно, удельная работа деформирования до разрушения испытанного композиционного материала намного выше, чем стали и алюминиевого сплава, однако эти энергии соответствуют различным значениям поперечного смещения.



а



б



в

Рис. 4. Зависимость удельной работы деформирования от величины сдвига для пластин из мягкой стали (1), алюминиевого сплава Д16Т (2) и композиционного материала РА6 (3) при статическом (а) и ударном нагружении со скоростью $v \approx 5$ м/с (б) и 50 м/с (в). (Точки на кривых соответствуют максимальному уровню нагрузки.)

При ударном нагружении удельная работа деформирования композиционного материала снижается до уровня энергии для алюминиевого сплава, мало изменяющейся при переходе от статического к ударному нагружению. Энергия ударного деформирования к моменту достижения максимальной нагрузки (на рис. 4, б, в точки) значительно ниже полной энергии деформирования и разрушения.

Сопоставление данных по удельной энергоёмкости деформирования до разрушения показывает, что композиционный материал имеет преимущество перед высокопрочным алюминиевым сплавом при статическом нагружении.

Разрушение композиционного материала при сдвиге связано с его разрыхлением и повреждением в кольцевой области, соответствующей зазору между матрицей и ударником, а также с возникновением в волокнах предельной деформации и разрыхления, без существенного распространения области повреждения материала за пределы этой области.

Компьютерное моделирование поперечного сдвига в тонкой пластине при ударном нагружении. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине толщиной 2 мм из композиционного материала РА6 (зашемлена по круговому контуру диаметром 40 мм) при поперечном сдвиге с постоянной скоростью 50 м/с, заданной на круговом контуре (диаметр 36 мм) нагружающего бойка с плоским торцом, осуществляли методом конечных элементов. Для расчетов использовали пакет прикладных программ ИМПРО [7]. Поведение материала описывали упруговязкопластической моделью.

Поле деформаций в пластине характеризуется существенно неоднородным трехмерным напряженно-деформированным состоянием. Вклад напряжений сдвига в срединной плоскости пластины наибольший при малых деформациях. Прогиб центральной части пластины приводит к тому, что она не прилегает к поверхности торца нагружающего стержня, а нагрузка на пластину при поперечном сдвиге локализована у контуров нагружения и защемления и вызывает большие напряжения сжатия на поверхностях контакта вблизи этих контуров.

Максимальная интенсивность деформации имеет место в нижнем и верхнем слоях пластины у контактных поверхностях (рис. 5). Резкая концентрация напряжений вблизи поверхностей контакта не возникает вследствие развития пластического течения.

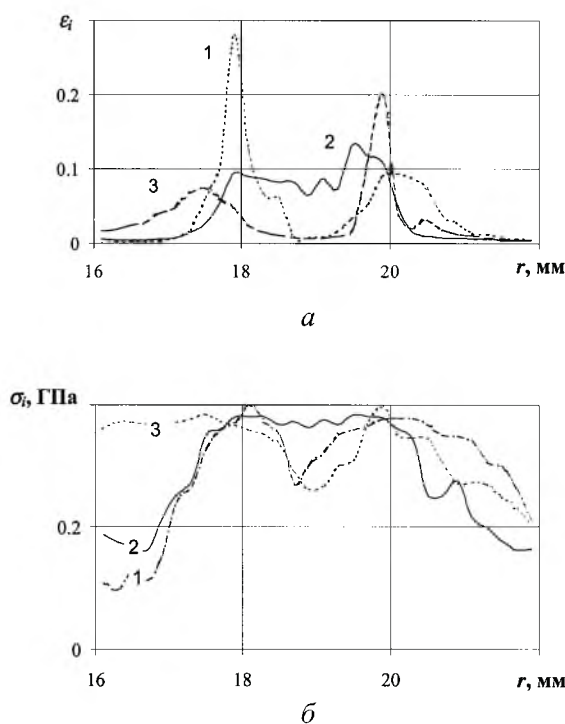


Рис. 5. Распределение вдоль радиуса в кольцевой области интенсивного деформирования пластины толщиной 2 мм из композиционного материала РА6 ($\sigma_T = 0,4$ ГПа, $E = 23,2$ ГПа, $\rho = 1270$ кг/м³) интенсивности деформаций (а) и напряжений (б) при поперечном сдвиге со скоростью 50 м/с через 15 мкс после начала нагружения: 1, 2, 3 – соответственно верхний, средний и нижний слой пластины.

В срединной плоскости пластины в области кольцевого зазора (между радиусами 18 и 20 мм) интенсивность деформации и напряжений может быть с удовлетворительной точностью принята однородной.

По результатам численного моделирования после кратковременной начальной стадии нагружения наступает устойчивое развитие локализованного деформирования материала в кольцевой области между контурами защемления и нагружающей поверхности стержня. Волновые процессы вследствие малого размера деформируемой области несут существенны, что обеспечивает надежность экспериментальной оценки удельной энергии деформирования и разрушения материала при ударном нагружении и высоких скоростях поперечного сдвига.

Заключение. Испытания на поперечный сдвиг тонких пластин, зашеченных по контуру, позволяют оценить удельную работу деформирования до разрушения различных материалов при статическом и ударном нагружении.

Значения удельной работы деформирования пластин до разрушения при поперечном сдвиге под действием статической нагрузки для композиционного материала с высокомодульными волокнами выше, чем для алюминиевого сплава Д16Т, и близки для мягкой стали.

При ударном нагружении пластин из алюминиевого сплава Д16Т и композиционного материала РА6 значения удельной работы деформирования до разрушения в результате поперечного сдвига близки.

Резюме

Коротко описано экспериментальную методику оцінки енергії, затраченої на руйнування тонкої пластини з круговим контуром затиснення при поперечному зсуві, що викликаний ударним навантаженням тіла з плоским торцем. Наведено результати випробувань зразків двох металевих матеріалів (м'яка сталь товщиною $\delta = 1,0$ мм і алюмінієвий сплав Д16Т, $\delta = 0,75$ мм) та ударостійкого композиційного матеріалу РА6, $\delta = 2,0$ мм. На основі аналізу експериментальних і розрахункових даних напружено-деформованого стану матеріалів (у межах кільцевої області між круговими контурами затиснення та поверхні навантаження) показано якісний зв'язок енергоємності руйнування з характеристиками динамічної міцності і пластичності. Результати досліджень дозволяють порівняти різні матеріали за енергоємністю їх руйнування при ударному навантаженні. Ця величина повніше характеризує енергоємність руйнування, аніж визначена при прогині внаслідок руху тіла зі сферичною поверхнею, і може використовуватися в розширеному діапазоні швидкостей ударного навантаження.

1. Степанов Г. В., Коваленко А. В. Неупругий прогиб круглой пластины локальным импульсом давления // Пробл. прочности. – 1988. – № 4. – С. 29 – 31.
2. Степанов Г. В., Мальцев В. А., Коваленко А. В. Прогиб металлических пластин под действием нагрузки, вызванной взрывом заряда ВВ // Там же. – № 2. – С. 112 – 114.

3. *Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Клепачко Я. Р.* Энергоемкость деформирования до разрушения заземленной по круговому контуру тонкой пластины при ударном нагружении // Там же. – 2001. – № 2. – С. 88 – 99.
4. *Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Токарев В. М.* Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении // Там же. – 2000. – № 4. – С. 62 – 69.
5. *Степанов Г. В., Зубов В. И., Токарев В. М. и др.* Характеристики прочности листового композиционного материала при ударном растяжении // Там же. – 2001. – № 1. – С. 38 – 48.
6. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.
7. *Харченко В. В.* Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом эффектов вязкопластичности. – Киев: Логос, 1999. – 280 с.

Поступила 24. 02. 2000