

УДК 620.178.6(043.2)

ЗАСТОСУВАННЯ БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ УДАРНОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Астанін В.В., Олефір Г.О.

Національний авіаційний університет

actanin@yau.edu.ua

Розроблено балістичний маятник для застосування у складі експериментальної установки для дослідження ударної міцності матеріалів, який забезпечує оптимальний спосіб кріплення зразка матеріалу для виділення й уможливлення реєстрації інтегральних енергетичних характеристик процесу ударної взаємодії розігнутого до певної швидкості ударника зі зразком, а також передавання інформації про них від датчиків, установлених на балістичному маятнику, до ЕОМ з метою збереження і подальшого аналізу. Проаналізовано математичну модель ударного процесу, отриманого при застосуванні розробленого пристрою, а також практично доведена його працездатність.

Ballistic pendulum is designed for applications as a part of experimental installation for investigation of material impact strength. It provides an optimal material specimen fastening method for differentiating and making possible to register integral energy characteristics of the impact interaction process of accelerated to a certain velocity impacter and the specimen. It also allows the corresponding measuring unit data transfer to computer with the aim of their saving and following analysis. The measuring unit complex is a part of the ballistic pendulum system. Mathematical model of the obtained at the designed device usage impact process is analyzed. Workability of the device is experimentally proved.

Вступ

У механіці твердого тіла розглядають залежно від величини взаємної швидкості контактуючих тіл квазістаціонарну та динамічну чи ударну взаємодію. Перша є частковим випадком другої і розглядається відповідно до спрощеної відносно другого випадку схеми, в якій не враховуються, зокрема, більш складні для математичного опису динамічні та хвильові процеси. Різниця між динамічною й ударною взаємодією не є чіткою і полягає в тому, що під ударом розуміють динамічну взаємодію з великими

© В.В. Астанін, Г.О. Олефір, 2009 швидкостями і, відповідно, протягом малих проміжків часу. При розгляді цих явищ на практиці, а саме при спробах передбачити, розрахувати напруження і поведінку деталей машин і механізмів при динамічних взаємодіях, згаданий аспект виявляє себе так [1]. При збільшенні швидкостей взаємодії виникає необхідність розглядати хвильові процеси в їх динаміці, так як їх апроксимація звичайними рівняннями теорії пружності низьких швидкостей призводить до значних похибок. Побудова математичної моделі взаємодії ускладнюється зростанням впливу мікроструктури матеріалу на результуючі напруження і деформації, оскільки при швидкостях, які розглядаються, кожна нерівномірність на малих відстанях, співрозмірних з міжмолекулярними чи міжатомними, відіграє значну роль. Це знижує ефективність математичного моделювання ударних процесів унаслідок неможливості врахування великої кількості мікрофакторів і породжує необхідність більш наближеного до реальних умов роботи деталі чи матеріалу при ударних навантаженнях

фізичного моделювання досліджуваних у даному випадку процесів.

Постановка завдання

Проведення фізичного експерименту на дослідження ударної міцності певного матеріалу вимагає наступної схеми досліду [2]: забезпечується контрольований розгін тіла, яке відіграє роль ударника, до необхідної швидкості; кріплення зразка досліджуваного матеріалу таким чином, щоб уможливити реєстрацію параметрів взаємодії; забезпечується контрольований удар розігнутого тіла зі зразком матеріалу під визначеним кутом, з визначеною швидкістю, у певній центральній чи зміщеній відносно центру кріплення зразка ділянці. Таким чином, у складі експериментальної установки розглядаються засоби розгону ударника, засоби кріплення зразка і засоби реєстрації параметрів взаємодії або їх комплекс, а також безпосередньо досліджуваний зразок матеріалу й ударник. При цьому потрібно враховувати, що у випадку, якщо різниця у жорсткості ударника і зразка не настільки велика, що деформацією ударника можна знехтувати, розглядати слід також процеси, що відбуваються в ньому, що, крім іншого, впливає на конструкцію засобів реєстрації.

У літературі [3] засоби розгону ударника, такі як копри з падаючим вантажем, з додатковими прискорювачами падаючого вантажу, пневматичні і порохові копри, електродинамічні установки контактної чи індукційного типу, газодинамічні установки з механічним стиском, з електронагрівом, з використанням процесу горіння робочої речовини, розглядаються як окремі елементи дослідницької установки, що може містити додаткові пристрої, наприклад, вимірювач швидкості розігнутого ударника чи комплекс віддаленого керування розгоном, проте

конструктивно відокремлений від системи кріплення зразка, за винятком можливої присутності елементів, які забезпечують задане взаємне розташування зразка й ударника. Це дає можливість досягнути більшої відповідності експерименту модельованим умовам. З іншого боку, що стосується засобів реєстрації параметрів взаємодії та кріплення зразка, конструкція цих елементів пов'язана між собою.

Кріплення зразка залежить від модельованих умов роботи. Це може бути консольне кріплення чи защемлення по периметру зразка, причому важливе значення має жорсткість опори [4]. Досить велику кількість параметрів взаємодії дають змогу фіксувати високошвидкісні камери [3]. Не втратили свого значення і знаходять новий поштовх до розвитку рентгенографічні та телеметричні методи реєстрації [5]. Як суміщені системи, що включають засоби кріплення зразка та реєструючу апаратуру, застосовуються різного типу маятникові пристрої [1; 2]. Отже, можна зробити висновок, що пристрої, які використовуються для вказаних цілей, являють собою достатньо складні комплекси, розробка і оптимізація яких для певних умов проведення та поставлених цілей експерименту може стати предметом окремого дослідження.

Ціллю проведеної роботи стала, таким чином, розробка пристрою, що забезпечує фіксацію досліджуваного зразка матеріалу при проведенні експерименту на ударну міцність, а також реєстрацію параметрів удару, які дають змогу провести аналіз взаємодії, визначити характеристики ударної міцності, отримати лабораторний матеріал для виявлення відповідності застосовуваних математичних моделей взаємодії процесам, які мають місце в реальності.

Розробка конструкції пристрою для дослідження процесів ударного руйнування матеріалів. При ударі кінетична енергія ударника передається підвишеному на маятнику зразку і відбувається її перетворення в потенціальну енергію пружної деформації, теплову і внутрішню енергію у зв'язку з руйнуванням міжатомних чи міжмолекулярних зв'язків, потенціальну енергію утримуючих зразок опор.

Конструкція розроблюваного пристрою, окрім жорсткого защемлення зразка досліджуваного матеріалу, повинна передбачати наявність датчиків реєстрації параметрів, що дають можливість безпосереднього дослідження вказаних процесів.

Найпростіша можлива конструкція кріплення зразка являє собою защемлення по периметру. Можливе використання вбудованих у зразок чи розташованих на його поверхні навколо центру удару і на зворотній стороні зразка датчиків тиску. Але це порушує структуру матеріалу, вносить у загальному випадку зміни в його реакцію на докладене навантаження. Крім того, в

результаті експерименту отримують значення тиску лиш в окремих точках зразка. При цьому залишається неврахованою енергія пружної деформації опор, оскільки їх можна вважати жорсткими лише до досягнення певного рівня енергії, яка ними сприймається.

Можлива також непружна їх деформація, час початку і швидкість утворення якої, що відповідають величинам сприйнятої опорами протягом часу взаємодії енергії, визначити, як і часові характеристики пружних деформацій опор, не є можливим.

Із заміною жорстких опор на пружні проблема не вирішується. Неврахованою залишається частина енергії, щодо якої відбувається дисипація в тепло. Можливий варіант жорсткого кріплення зразка в опорі, закріпленій на роликах і яка має можливість руху по напрямній, чому перешкоджає лише тертя кочення, набагато менше, ніж сили пружності, що виникають при деформації самої опори. Таким чином, стає можливим контролювати вказаний перехід непоглинутої досліджуваним матеріалом енергії ударника на конструкцію, яка має своєю складовою виготовлений із нього елемент. При цьому, тим не менше, виникає проблема низької стійкості такої конструкції по напрямку руху.

Іншим способом використати низький опір тертя кочення для контролю сприйнятої опорами енергії є використання пристроїв маяткового типу. Відомі балістичні маятники, які являють собою масивне тіло, закріплене на підвісі, і використовуються для визначення швидкості куль. Куля, що рухається, потрапляючи в нерухомий маятник, викликає його коливання. Знаючи масу кулі m , масу маятника M і максимальну величину підйому центра ваги маятника h , можна розрахувати швидкість кулі V в момент співударяння її з маятником. Використання такого балістичного маятника в комплексі з апаратурою, що реєструє величину відхилення підвісу, на якому жорстко защемлений по своєму периметру зразок, у кожний момент часу дає можливість розв'язати поставлене завдання.

При використанні жорсткого підвісу із розгляду автоматично виключаються явища, що мають своєю причиною обертальний момент відносно його вертикальної осі внаслідок попадання ударника в точку зразка, що знаходиться справа чи зліва від точки, яка відповідає центру мас підвісу. Щоб не допустити заїдання при відхиленні підвісу, вісь обертання встановлена на самоцентрованих підшипниках. Відповідні результати вимірів залежать, проте, від центрування здійсненої ударної взаємодії. Із подібних міркувань для розробленого пристрою використовується більш жорстка конструкція підвісу закріпленого зразка із двох балок (рис. 1).

Для досліджень ударної міцності зразків матеріалів ударниками діаметром 5...15 мм для уникнення суттєвого впливу способу защемлен-

ня зразка по периметру (або ж одностороннього защемлення при проведенні відповідних досліджень) достатньо використовувати зразки квадратної форми з довжиною сторони 250 мм. Затиснення краю зразка, встановленого на посадковому місці, здійснюється планками шириною 25 мм, в результаті вільна ділянка має форму квадрата зі стороною 200 мм, тобто більш ніж у десять разів більшою за діаметр ударника. Конструкцією пристрою передбачена можливість заміни рамки кріплення зразків на рамку іншого розміру.

Реєструюча апаратура, що поєднує в собі простоту і надійність конструкції з інформативністю вимірюваних параметрів, представляє собою датчик відхилення підвісу маятника.

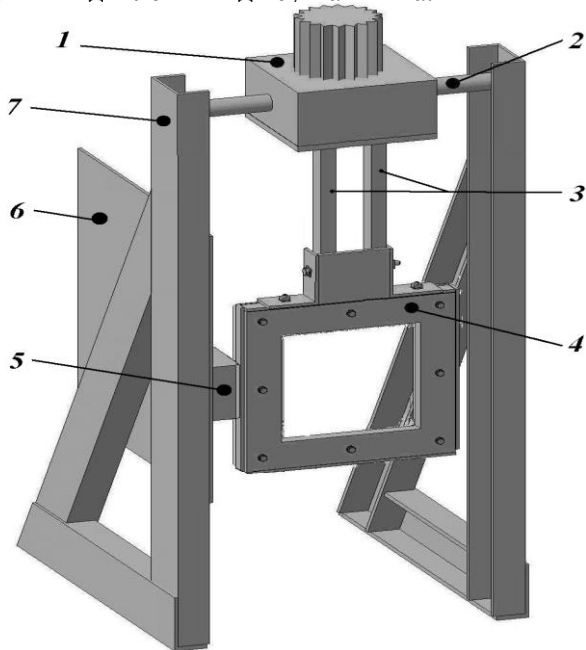


Рис. 1. Конструкція балістичного маятника:

- 1 — блок встановлення кута повороту підвісу відносно осі удару; 2 — вісь повороту при відхиленні маятника; 3 — підвіс системи кріплення зразка; 4 — система кріплення зразка; 5 — блок реєстрації відносно пластини; 6 — відхилення підвісу від положення рівноваги; 7 — рама балістичного маятника

Сигнал із датчика подається на ЕОМ, якою за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення здійснюється запис його зміни в часі протягом експерименту і наступна обробка. За цими даними стає можливим визначити швидкість і прискорення відхилення, а відповідно й інші інтегральні енергетичні характеристики ударної взаємодії.

Розглянемо конструкцію застосованого швидкодіючого електронно-оптичного датчика відхилення підвісу балістичного маятника. Блок-схема оптичного датчика переміщень зображена на рис. 2.

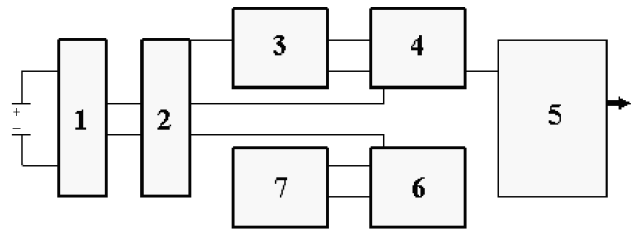


Рис. 2. Блок-схема оптичного датчика переміщень:

- 1 — регулятор напруги і енергоспоживання; 2 — генератор; 3 — матриця фотоелементів; 4 — процесор обробки зображень; 5 — транслятор даних про напрям переміщення оптичного датчика; 6 — блок керування; 7 — система підсвічення поверхні

Ядро системи складає блок — процесор обробки зображень 3 із вбудованим приймачем світлового сигналу. Живлення подається до блоку регулювання напруги і контролю енергоспоживання 4, до нього також під'єднаний додатковий зовнішній фільтр живлення. Зовнішній сигнал із задаточного кварцевого генератора подається на блок генератора 2. Частота вхідного сигналу задається кварцевим резонатором у межах 28—32 МГц. Поверхня під датчиком освітлюється світлодіодом, що регулюється блоком керування 5. Дані про напрям переміщення оптичного датчика передаються через блок 1. Мікросхема зовнішнього контролера отримує через нього дані з пам'яті оптичного сенсора з частотою раз у мілісекунду. Ініціалізує передавання даних зовнішній мікроконтролер, який визначає частоту слідкування за переміщеннями датчика.

За допомогою світлодіода і системи двох фокусуємих його світло лінз під датчиком освітлюється ділянка поверхні. Відображене від цієї поверхні світло, у свою чергу, збирається іншою лінзою і потрапляє на світлочутливу матрицю мікросхеми процесора обробки зображень.

Застосований оптичний процесор робить знімки поверхні і обробляє їх. Структурно він складається з системи отримання зображення й інтегрованого процесора обробки знімків. На основі аналізу черги послідовних знімків процесор вираховує інтегруючі показники, що свідчать про напрям переміщення датчика вздовж осей X та Y і передає результати своєї роботи назовні по послідовному порту. Оптимальна відстань від оптичної системи із двох лінз до відбиваючої поверхні під датчиком повинна потрапляти в діапазон від 2,3 до 2,5 мм, що забезпечується конструкцією пристрою.

Знімки поверхні під датчиком проводяться з частотою $8 \cdot 10^3$ Гц згідно з програмою опитування і обробки зображення. Ця величина характеризує швидкодію датчика і можливу отримувану точність розподілу швидкості відхилення підвісу в часі. Щоб визначення переміщення датчика відносно рухомого підвісу у випадку кріплення датчика на стійці опори балістичного маятника або переміщення закріпленого на підвісі датчика відносно

нерухомої опори було можливим шляхом порівняння зроблених знімків поверхні процесором, ці знімки повинні частково перекривати один одного. Таким чином, враховуючи величину знімків (роздільна здатність знімка становить 10^{-5} м) і частоту їх здійснення, розраховуємо максимальну швидкість відхилення, яку може сприйняти пристрій. Така допустима максимальна швидкість переміщення складає 1 м/с. Розрахуємо із умови рівності початкового і кінцевого імпульсів системи ударник — балістичний маятник швидкість ударника, при якій відхилення підвісу відбуватиметься із швидкістю, яку дає змогу реєструвати датчик. Враховуючи різницю мас ударника і підвісу, робимо висновок, що допустима швидкість ударника становить 1000 м/с. Із технічних характеристик застосовуваних в датчику напівпровідникових деталей також відомо, що допустиме прискорення відхилення становить 150 м/с^2 , що також значно перевищує очікувані при проведенні експерименту величини. Крім того, при розрахунках слід враховувати, що внаслідок пробивання ударником шарів досліджуваного матеріалу і поглинання та розсіювання енергії удару реальна швидкість ударника може перевищувати вказану величину без втрати точності вимірювань. Точність може бути підвищена за рахунок використання датчика з матрицею більшого розміру або за рахунок підвищення швидкості опитування.

Математична модель роботи розробленого пристрою. При проведенні досліджень на ударну міцність для визначення часу удару, ударних сил і викликаних ними в тілах напружень і деформаций необхідно врахувати механічні властивості матеріалів тіл і зміну цих властивостей за час удару, а також характер початкових і граничних умов навантаження. Розв'язання проблеми суттєво ускладнюється не тільки внаслідок складностей суто математичного характеру, але і через відсутність достатніх даних про параметри, які визначають поведінку матеріалів тіл при ударних навантаженнях, що призводить до введення при виконанні розрахунків ряду суттєвих спрощуючих припущень [1; 6]. Деформація в місці контакту розповсюджується в тілі у вигляді пружних хвиль зі швидкістю, яка залежить від фізичних властивостей матеріалу. Якщо час проходження цих хвиль через усе тіло набагато менше часу удару, то впливом пружних коливань можна знехтувати і вважати характер контактної взаємодії при ударі таким же, як у статичному стані. На таких припущеннях ґрунтується контактна теорія удару Герца. Якщо ж час проходження пружних хвиль через тіло порівнянний з часом удару, то для розрахунків користуються хвильовою теорією удару. Вивчення удару не цілком пружних тіл вимагає

врахування як пружних, так і пластичних властивостей матеріалів. З розв'язком цієї задачі і пов'язаних з нею проблем визначення механічних властивостей матеріалів тіл при ударі, дослідження змін їх структури і процесів руйнування широко опираються на аналіз і узагальнення результатів численних експериментальних досліджень. Експериментально досліджуються також специфічні особливості удару тіл при великих швидкостях і при дії вибуху, який у випадку безпосереднього контакту заряду з тілом можна вважати еквівалентним співударянню зі швидкістю до 1000 м/с.

При пробиванні зразків ударником балістичному маятнику передається ударний імпульс, який викликає його відхилення від положення рівноваги на величину S , за якою можна розрахувати енергетичні витрати, обумовлені деформуванням і руйнуванням перешкоди [1; 2]. Такий розрахунок базується на рівнянні балансу енергії:

$$E = \frac{m}{2} \left[2V_0^2 \frac{S}{S_1} - V_0^2 \left(\frac{S}{S_1} \right)^2 \right] = \frac{mV_0^2}{2} \left[2 \frac{S}{S_1} \left(1 - \frac{S}{2S_1} \right) \right],$$

де m — маса ударника; V_0 — швидкість зіткнення ударника з перешкодою; S_1 — положення маятника, $S_1 < S$.

У зразку матеріалу, який взаємодіє з ударником, виникають такі напруження, як якби до нього була прикладена сила інерції тіла, яким здійснюється удар. Ці напруження можна розрахувати, якщо розглядати силу інерції P_d як статичне навантаження конструкції. Складність полягає у знаходженні вказаної сили інерції. Тривалість удару, тобто величина того проміжку часу, протягом якого відбувається падіння швидкості до нуля, не відома. Тому залишається невідомою величина прискорення цього тіла, а відповідно, і сили P_d . Таким чином, хоча розрахунок напружень при ударі являє собою частковий випадок задачі врахування сил інерції, однак для розрахунку сили P_d і пов'язаних з нею напружень і деформацій тут доводиться застосовувати інший спосіб і користуватися законом збереження енергії. При ударі відбувається дуже швидке перетворення одного виду енергії в інший. Кінетична енергія ударника перетворюється в потенціальну енергію деформації. Виражаючи цю енергію у вигляді функції сили P_d чи напружень або деформаций, отримуємо можливість розрахувати ці величини. Такий загальний прийом розрахунку на удар передбачає, що вся кінетична енергія ударника цілком переходить у потенціальну енергію деформації пружної системи. Це припущення не відповідає дійсності. Кінетична енергія частково перетворюється в теплову енергію і енергію непружної деформації.

Разом з тим при високих швидкостях удару

деформація за час удару не встигає поширюватись на весь об'єм зразка, що піддається удару, і в місці удару виникають значні місцеві напруження, що перевищують границю текучості матеріалу. Подібне явище може мати місце навіть у тому разі, коли швидкість удару низька, але жорсткість чи маса конструкції, яка піддається удару, велика.

Як при статичному, так і при динамічному навантаженні напруження в матеріалі залежить від величини стискаючої сили і від площі дії навантаження. Але при статичній дії навантаження сила, яка передається досліджуваному тілу, є постійною і не залежить від розмірів і матеріалу зразка, при ударі ж величина сили P_d , яка викликає напруження в зразку, залежить від прискорення, яке передається від нього на ударник, тобто від величини проміжку часу, протягом якого змінюється швидкість ударника. В свою чергу цей проміжок часу залежить від величини динамічної повздовжньої деформації ΔL_d , від податливості матеріалу зразка. Чим ця величина більша, тобто в тому числі чим менший модуль Юнга E , тим більша тривалість удару, менше прискорення і менший тиск P_d [6].

Таким чином, наприклад, при рівномірному розподілі напружень, однаковому у всіх перетинах зразка матеріалу, динамічне напруження буде зменшуватись зі збільшенням площі взаємодії і зі збільшенням податливості зразка (тобто зі збільшенням товщини і зменшенням модуля пружності E). Зокрема, з певним наближенням можна вважати, що при ударі величина напружень залежить уже не від площі зразка, яка піддається навантаженню, а від його об'єму. Опір зразків ударним навантаженням залежить і від моменту опору, і від жорсткості. Чим вища податливість, здатність до деформування матеріалу, тим більш значну силу удару він може сприйняти при одних і тих самих допустимих напруженнях [7]. Найвище поглинання енергії зразок дає в тому разі, коли в усіх його перетинах, паралельних поверхні взаємодії, найбільші напруження будуть однаковими, тобто якщо це буде композитний зразок різного по товщині опору. Такі зразки при одному й тому ж допустимому напруженні дають більше поглинання енергії удару.

Із розглянутого вище стає зрозумілим, що, знаючи розподіл у часі переходу кінетичної енергії ударника в кінетичну енергію руху підвісу маятника зі зразком, що забезпечується описаним вище присутнім в конструкції маятника датчиком відхилення підвісу від положення рівноваги, можна отримати інформацію про ту складову початкової енергії, яка не поглинається матеріалом зразка. В модельованому експерименті випадку вона є тією залишковою енергією, не допустити дію якої на захищений об'єкт мають на меті покриття із досліджуваного матеріалу. Тобто

чим більшою є її величина, тим менш вираженими є його захисні властивості. З іншого боку, розподіл цієї величини в часі дає можливість робити висновки щодо процесів поглинання, які відбуваються в місці контакту ударника зі зразком, у тому числі про послідовну взаємодію його з різними шарами при дослідженні композитного матеріалу. В цьому випадку між поглинутою енергією і переміщенням спостерігається зворотний зв'язок, зафіксовані на графіках локальні мінімуми прискорення відхилення підвісу відповідають або інтенсивному локальному руйнуванню шару, або проходженню ударником пустот.

Проведення досліджень за допомогою запропонованого пристрою Суть застосованого методу дослідження зразків матеріалу на ударну міцність за допомогою лабораторної установки типу «GANCHEN» полягає в наступному (рис. 3).

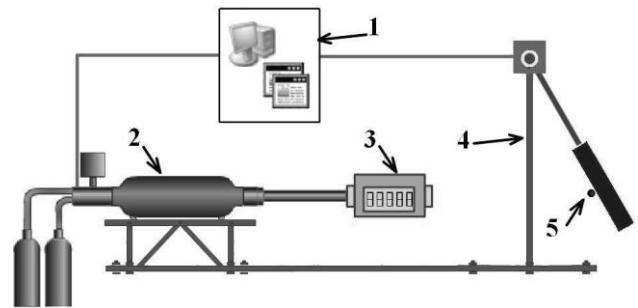


Рис. 3. Схема застосованого методу дослідження зразків матеріалу на ударну міцність за допомогою лабораторної установки типу «GANCHEN»:
 1 — ЕОМ; 2 — металевий пристрій; 3 — вимірювач швидкості ударника; 4 — балістичний маятник; 5 — ударник
 Досліджувані зразки пробиваються ударником як перешкоди. Енергетичні характеристики процесу співударяння визначаються за допомогою балістичного маятника, на якому кріпляться зразки досліджуваного матеріалу.
 За допомогою розробленого програмного забезпечення для роботи з установкою реалізована можливість побудови залежностей швидкості відхилення маятника, прискорення при цьому процесі, а також величини відхилення в часі з високою точністю.

При пробиванні двошарового композитного пластикового зразка матеріалу був зафіксований характерний перелом кривої зміни відхилення балістичного маятника в часі, що відповідає моменту проходження ударника від першого шару до другого.

Відповідна крива переміщення при відхиленні приведена на рис. 4, а. Зміна швидкості у відповідні моменти часу проілюстрована графіком на рис. 4, б.

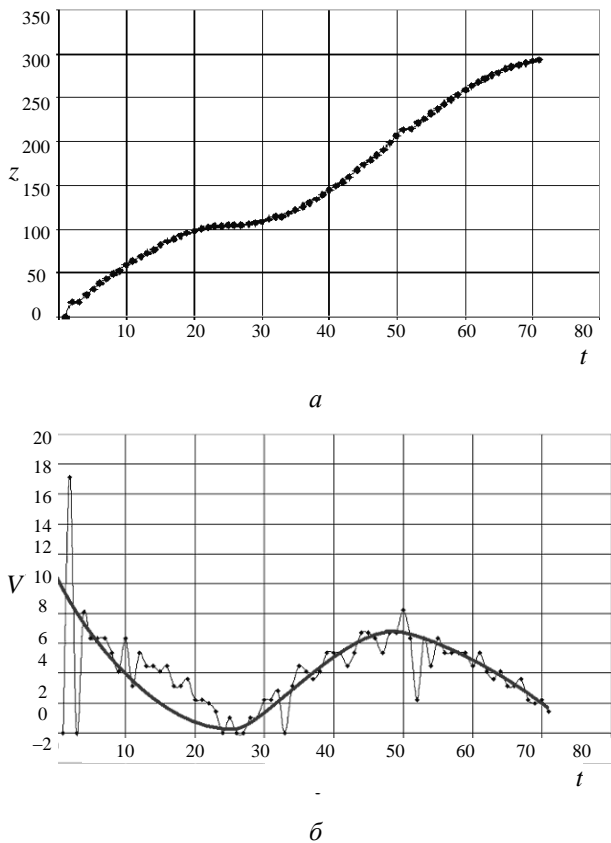


Рис. 4. Крива відхилення (а) балістичного маятника та зміни швидкості відхилення (б) в часі

Висновки. Таким чином, при використанні розробленого балістичного маятника вперше отримані результати, що дають можливість за інтегральними показниками оцінити процеси руйнування кожного з шарів досліджуваної багатошарової композитної конструкції і, що найважливіше, відокремити руйнування кожного її шару. Розроблений балістичний маятник для застосування у складі експериментальної установки для дослідження ударної міцності матеріалів, який забезпечує оптимальний спосіб кріплення зразка матеріалу для виділення й

уможливлення реєстрації інтегральних енергетичних характеристик процесу ударної взаємодії розігнаного до певної швидкості ударника зі зразком, а також передавання інформації про них від датчиків, установлених на балістичному маятнику, до ЕОМ з метою збереження і подальшого аналізу. Проаналізована математична модель ударного процесу, отриманого при застосуванні розробленого пристрою, а також практично доведена його працездатність.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Прочность материалов и конструкций* / за ред. В.Т. Трощенко. — К. : Академперіодика, 2005. — С. 574—703.
2. *Астанин В.В.* Деформирование і разрушение преград при пробивании цилиндрическим ударником // *Динамическая прочность і трещиностойкость конструкционных материалов* / В.В. Астанин. — К., 1986. — С. 23—27.
3. *Златина Н.А., Мишина Г.И.* Баллистические установки і их применение в экспериментальных исследованиях / под ред. Н.А. Златина і Г.И. Мишина. — М. : Наука, 1974. — С. 12—187.
4. *Степанов Г.В.* Прочность при импульсных нагрузках // *Механическое поведение материалов при различных видах нагружения*. — К.: Логос, 2000. — С. 421—536.
5. *Глушак Б.Л.* Исследование прочности материалов при динамических нагрузках / Б.Л. Глушак, В.Ф. Куропатенко, С.А. Новиков. — Новосибирск : Наука, 1992. — 294 с.
6. *Зубов В.И., Степанов Г.В., Широков А.В.* Деформирование и разрушение образцов из высокопрочных металлов при высокоскоростном нагружении // *Артиллер. і стрелк. вооружение*. — 2004. — С. 17—22.
7. *Глушак Б.Л.* Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках / Б.Л. Глушак, С.А. Новиков, А.И. Рузанов, А.И. Садырин. — Нижний Новгород : Нижегородский ун-т, 1992. — 192 с.

Стаття надійшла до редакції 26.02.09