

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Наумов Іван Володимирович



УДК 539.3

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ В КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ АПАРАТУРИ ПРИ УДАРІ ТА
ПРОБИВАННІ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі систем та процесів управління Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бреславський Дмитро Васильович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
декан інженерно-фізичного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Воробйов Юрій Сергійович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
керівник відділу нестационарних
механічних процесів

доктор фізико-математичних наук, професор
Ольшанський Василь Павлович,
Харківський національний технічний університет сільського
господарства ім. Петра Василенка,
професор кафедри теоретичної механіки
та деталей машин

Захист відбудеться «27» листопада 2013 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 18 » жовтня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Сукіасов В.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Оцінювання динамічних процесів та міцності конструктивних елементів приладів та апаратури при ударних взаємодіях з зовнішніми тілами є одним з найважливіших питань у сучасних галузях машинобудування, таких як приладобудування, транспортна, авіаційно-ракетна та космічна техніка. Умови експлуатації літаків та космічної техніки, вікон електровозів та автомобілів, корпусів й складових частин електроприладів та комп'ютерної техніки часто характеризується імпульсними, ударними й пробивними навантаженнями. У багатьох випадках ці навантаження є такими, що повторюються у часі, призводять до залишкових пластичних деформацій чи навіть до руйнування конструктивного елементу.

В цьому напрямку залишається перспективним удосконалення експериментально-розрахункових методів оцінювання впливу швидкості ударника та динамічної межі пластичності матеріалів конструкцій чи конструктивних елементів приладів при повторних ударах та пробиванні. Ударні навантаження є також характерними для пристроїв збереження даних у сучасній комп'ютерній техніці. В останні роки велику увагу приділяють питанням, що пов'язані з запобіганням несанкціонованого доступу до інформації, яка зберігається у пристроях сучасної комп'ютерної техніки на магнітних дисках. Одним з найбільш дієвих способів знищення інформації на дисках є їхнє механічне руйнування пристроями ударної або пробивної дії. Тому розробка методів експериментального та розрахункового оцінювання повторного деформування тонкостінних конструктивних елементів приладів комп'ютерної апаратури при ударі та пробиванні є актуальною задачею, розв'язання якої визначає тему дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі систем та процесів управління НТУ «ХПІ» згідно з планом фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт МОН України: «Створення математичних моделей керованого руху суттєво пружних штучних супутників Землі», (ДР № 0107U000597), «Розробка методів забезпечення ресурсу елементів конструкцій та систем управління космічних літальних апаратів» (ДР № 0110U001245) та «Створення методів оцінки конструкційної міцності та довговічності при повзучості елементів та обладнання енергетичних машин» (ДР №0112U000403), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток експериментальних та розрахункових методів дослідження динамічних процесів в тонкостінних конструктивних елементах апаратури при ударі для оцінювання деформування та пробивання пластинчатих деталей сучасної комп'ютерної техніки.

Для реалізації мети в дисертаційній роботі сформульовані завдання:

– створити експериментальну установку з інформаційно-вимірювальним комплексом для реєстрації результатів випробувань при ударах та пробиванні тонких пластин, що виготовлені із різних матеріалів;

– виконати експериментальні дослідження властивостей плоских зразків зі сталі та алюмінієвого сплаву та встановити закономірності деформування і руйнування квадратних та круглих пластин при ударі та пробиванні;

– створити розрахунково - експериментальний підхід для визначення властивостей швидкості деформацій та динамічної межі текучості матеріалів від числа ударів при пробиванні комп'ютерних жорстких магнітних дисків;

– розробити на базі методу скінченних елементів та динамічної теорії пластичності метод розрахункового оцінювання динамічних процесів деформування та руйнування при повторних ударах та пробиванні тонкостінних елементів апаратів і приладів;

– виконати розрахункові дослідження для встановлення фізико – механічних закономірностей динамічного деформування та руйнування при ударі та пробиванні тонкостінних конструкцій.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси пружно-пластичного деформування та руйнування матеріалів при повторних ударах та пробиванні.

Предмет дослідження – параметри динамічного деформування тонкостінних пластинчатих елементів апаратів та приладів, комп'ютерних жорстких магнітних дисків.

Методи дослідження - експериментальні методи: одноосьовий розтяг зразків, визначення твердості за Віккерсом – для визначення властивостей матеріалу, методи тензометрії та метод сіток, - застосовано з метою визначення статичних та динамічних механічних характеристик пружно-пластичного деформування та руйнування пластин при повторних ударах та пробиванні; методи математичного та комп'ютерного моделювання на базі теорій пружності, коливань, динамічної пластичності та руйнування, обчислювальні методи: метод скінченних різниць для інтегрування за часом та метод скінченних елементів для розрахункового оцінювання ударних процесів та руйнування в тонких пластинах і комп'ютерних жорстких магнітних дисків.

Наукова новизна одержаних результатів:

– уперше експериментально отримано обґрунтування нових фізико-механічних закономірностей динамічного пластичного деформування та руйнування при ударі та пробиванні тонких пластин і комп'ютерних жорстких магнітних дисків;

– запропоновано розрахунково-експериментальний підхід для визначення матеріальних констант, що входять до залежностей швидкості деформацій від числа ударів та динамічної межі текучості матеріалів від швидкості деформацій при пробиванні комп'ютерних жорстких магнітних дисків.

– на базі методу скінченних елементів та теорії пластичності розроблено узагальнений розрахунковий підхід для оцінювання деформування і руйнування тонкостінних конструктивних елементів апаратів і приладів при повторних ударах та пробиванні;

– встановлено вплив швидкості ударника та закономірності пружно-пластичного динамічного деформування при ударі та пробиванні пластин приладів, накопичувачів на жорстких магнітних дисках сучасних комп'ютерних комплексів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створеній експериментальній установці з інформаційно-вимірвальним комплексом для рес-

трації результатів випробувань зразків матеріалів та тест-пластин, отриманих експериментальних даних, а також у теоретично й експериментально обґрунтованому розрахунковому підході для оцінювання деформування і руйнування тонко-стінних конструктивних елементів апаратів і приладів при ударі та пробиванні.

Розроблений підхід для розрахунку ударної взаємодії може бути використаний при проектуванні та доробці елементів аерокосмічної техніки, енергетичного обладнання, автомобілебудування та приладобудування.

Отримані дані розрахункових та експериментальних досліджень динаміки пружно-пластичного деформування та руйнування при ударах та пробиванні комп'ютерних жорстких магнітних дисків використано у практиці проектування ТОВ «Тетра, LTD» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Результати дисертаційної роботи, що винесені на захист, отримано особисто здобувачем. Серед них: проект та виготовлення інформаційно-вимірального експериментального комплексу; створення експериментальної установки та результати експериментів з ударного деформування пластин; алгоритм та результати розрахунків удару циліндром по пластинах; розрахунково-експериментальний підхід для оцінювання кількості повторних ударів при пробиванні; експериментально встановлені властивості руйнування матеріалу накопичувача на магнітних дисках та результати експериментів при повторних ударах та пробиванні; алгоритми та результати розрахунків пружно-пластичного деформування тонкостінних елементів апаратури.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались на: 5, 7 та 9 міжвузівських науково-практичних конференціях «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій», (м. Харків, 2006, 2008, 2010 рр.); XVII, XVIII та XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2009, 2010, 2012 рр.), 3-й Міжнародній конференції з нелінійної динаміки «Nonlinear Dynamics - 2010» (м. Харків, 2010 р.); 7th International Symposium on Impact Engineering (м. Варшава, Польща, 2010); III Міжнародній науково-технічній конференції: «Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций», (м. Ялта, 2011р.), 25-й Міжнародній науково-технічній конференції «Математические методы в технике и технологиях» (м. Харків, 2012р.). Робота доповідалась та обговорювалась в повному обсязі на семінарах кафедр динаміки та міцності машин й систем і процесів управління НТУ «ХПІ» у 2009-2013 рр.

Публікації. За результатами проведених у дисертаційній роботі досліджень здобувачем опубліковано 15 наукових праць, з них 6 статей у фахових виданнях України, 9 - у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 144 сторінки, з них 102 рисунки по тексту, 12 таблиць по тексту, 3 додатки на 6 сторінках, 153 найменування використаних джерел на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, наукову та практичну цінність теми дисертаційної роботи. Сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано стан в напрямі розробок щодо експериментально-розрахункових методів дослідження пружнопластичного деформування конструктивних елементів при ударному навантаженні чи пробиванні.

Задачі ударної взаємодії тіл традиційно привертала увагу дослідників, що пов'язано з важливими практичними застосуваннями ударних процесів у промисловості. Вивчення пружного удару почалось з часу розвитку класичної механіки. Для отримання даних з властивостей ударного деформування та руйнування нових матеріалів та перевірки розрахункових результатів протягом останнього сторіччя проводились експериментальні дослідження.

У розділі надано огляд експериментальних та сучасних розрахункових досліджень, установок та методів, що застосовуються для аналізу динаміки та ударної міцності матеріалів та елементів конструкцій. Основний внесок в роз-виток експериментальних методів дослідження деформування та руйнування при ударному навантаженні зроблено роботами Ю.С. Воробйова, В. Гольдсмита, М.О. Кільчевського, С. Немат-Нассера, Г.І. Погодина-Алексеєва, Г.С. Писаренка, Г.В. Степанова, А.П. Філіппова, О.М. Шупікова, Є.Г. Янютіна та багатьох інших.

Паралельно з експериментальним вивченням, велика увага приділялась й методам розрахункової оцінки напружено-деформованого стану конструктивних елементів машин, обладнання та приладів при ударному деформуванні. У теперішній час на практиці використовуються емпіричні, інженерні, спрощені, аналітичні, напіваналітичні та чисельні підходи. Теоретичний опис процесів пружного та пружно-пластичного ударного деформування надано у роботах В.В. Астаніна, В.Г. Баженова, Г.І. Баренблатта, В.Л. Бідермана, Ю.С. Воробйова, А.А. Гвоздева, Є.Г. Голоскокова, В. Гольдсмита, М.М. Давіденкова, Р.М. Дейвіса, Ю.А. Дем'янова, О.М. Динника, О.А. Іл'юшина, В.М. Іонова, А.Ю. Ішлинського, М.О. Кільчевського, В.Д. Кубенко, В.М. Кукуджанова, В.С. Ленського, П.П. Лепіхіна, С. Немат-Нассера, П.М. Огибалова, В.П. Ольшанського, Дж. Пірсона, Дж.С. Райнхарда, Х.А. Рахматуліна, А.Я. Сагомояна, В.В. Соколовського, Г.В. Степанова, С.П. Тимошенка, А.П. Філіппова, О.М. Шупікова, Є.Г. Янютіна та багатьох інших.

Сучасний досвід застосування МСЕ при моделюванні удару по тонкостінним конструкціям відображено у роботах таких вчених, як К.-Ю. Бате, Т. Беличко, Дж. Оден, Дж. Бонет, М. Крісфілд, В.М. Кукуджанов, С. Немат-Насер та багатьох інших. За результатами літературного огляду показано, що методи оцінювання динамічних процесів в конструктивних елементах апаратури при повторних ударах та пробиванні потребують подальшого розвитку.

У **другому розділі** надано математичну постановку задачі та запропоновано метод розрахунку пружно-пластичного деформування пластинчатих констру-ктивних елементів при ударному навантаженні. Задача пробивання відмінна від

традиційних задач пружно-пластичного деформування тіл; об'єкт, що пробивається, та сам ударник розглядаються в межах об'єднаної розрахункової схеми, в області контакту деформування матеріалу відбувається з високою швидкістю та тіла, що взаємодіють, знаходяться в умовах пластичної течії. У розділі описано скінче-нно-елементну постановку задач пробивання, розв'язання якої реалізовано за схемою МСЕ, де застосовано ефективний алгоритм зв'язування підходів Лагранжа та Ейлера (ALE).

Зв'язок між компонентами тензора швидкостей деформації та компонентами дівіатора напружень визначено за співвідношеннями Прандтля – Рейса:

$$2G(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_0 \delta_{ij}) = \frac{Ds^{ij}}{Dt} + \lambda s^{ij} \quad (\lambda \geq 0), \quad \frac{Ds^{ij}}{Dt} = \frac{ds^{ij}}{dt} - s^{ik} \omega_{jk} - s^{jk} \omega_{ik}, \quad (1)$$

де G – модуль зсуву; δ_{ij} – тензор з компонентами символу Кронекера; $3\dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}_{kk}$ – швидкість об'ємної деформації; $\omega_{ij} = (\Delta_i v_j - \Delta_j v_i)/2$ – тензор швидкості обертання точок тіла, як твердих часток; $\sigma_{TD} = \sqrt{3(\sigma^{ij} \sigma_{ij})}/2$ – динамічна межа пластичності ($\lambda = 0$ – при пружній деформації, $\lambda > 0$ – при пластичній деформації); D – тензор швидкості деформацій, компоненти якого обчислюються наступним чином: $D_{ij} = 1/2(v_{i,j} + v_{j,i})$.

У підсумку задачу зведено до диференціального рівняння

$$[M]\{\ddot{d}\} = \{F\}_i + \{F\}_e, \quad (2)$$

де $\{\ddot{d}\}$ – вектор вузлових прискорень; $[M]$ – матриця мас; $\{F\}_i, \{F\}_e$ – вектори внутрішніх та зовнішніх сил, що визначаються в результаті підсумовування по усім елементам системи.

Часову дискретизацію за центральною диференціальною схемою скінченних різниць другого порядку точності застосовано для визначення значень прискорень, швидкостей і переміщень

$$\{\ddot{d}\}_n = [M]^{-1}(\{F\}_i + \{F\}_e); \quad \{\dot{d}\}_{n+\frac{1}{2}} = \{\dot{d}\}_{n-\frac{1}{2}} + \{\ddot{d}\}_n \Delta t; \quad \{d\}_{n+1} = \{d\}_n + \{\dot{d}\}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t, \quad (3)$$

де індекси $n, n+1/2, n+1$ відносяться до відповідних моментів часу: $t_n, t_{n+1/2}, t_{n+1} = t_n + \Delta t$.

Алгоритм розв'язання задачі на кожному кроці часу складається з обчислення: вузлових сил; вузлових прискорень; вузлових швидкостей; приростів переміщень і переміщень; деформацій елементів; напружень в елементах. Після цього відбувається перехід до наступного кроку інтегрування за часом. Для нового значення t обчислюються значення вузлових зусиль в елементах, після чого алгоритм повторюється. Це відбувається до того моменту, поки не буде пройдено весь проміжок часу, для якого розв'язується задача. Основна ідея міститься у комбіновано-му ALE підході, в якому SE сітка залишається незмінною, але має місце рух матеріалу через її вузли. Також є необхідним, щоб разом з матеріальними точками через сітку переносились так звані змінні стану. У зв'язку з тим, що в ALE підході

вузли не рухаються за точками матеріалу при деформуванні, вираз для похідної будь-якої змінної стану \dot{z} у рухомій системі відліку записують як $d\dot{z}/dt = \dot{z} + \nabla z(v_c - \dot{u})$, де \dot{z} позначено похідну змінної стану за часом у нерухомій системі координат; v_c - швидкість руху SE сітки; \dot{u} - швидкість матеріальної точки (частки матеріалу). У скінченно-елементній постановці вираз для густини потужності деформацій записується як $\dot{U} = \left([D^e] [B^e] \left\{ \dot{u}^{nod} \right\} \right) \cdot \left([B^e] \left\{ \dot{u}^{nod} \right\} \right)$. Крім цього, в ALE постановці відомо, що $\dot{W} = \nabla W v_c$. Звідси випливає, що значення енергії W для точки, що рухається разом з сіткою, не змінюється за часом. Це дозволяє спростити алгоритм переходу від підходу Лагранжа до підходу Ейлера та навпаки. Наступний крок чи вирівнювання сітки є необхідним для мінімізації викривлення сітки. Далі виконується операція адвекційного кроку – змінні стану приводяться до вузлів та елементів нерухомої сітки. При цьому значення кроку інтегрування обмежується максимальним значенням, яке визначається за швидкістю зсуву в матеріалі, розміром елементів та їхньою середньою швидкістю. В розрахунках застосовуються два адвекційні алгоритми – донорських комірок та алгоритм Ван Лі. Розрахунки на даному кроці інтегрування завершують обчисленням напружень та деформацій в SE за поточним станом процесу деформування, після цього відбувається новий крок за часом. Інтегрування відбувається до закінчення виділеного часового інтервалу.

У випадку, коли значення деформацій стають великими, здійснюється зміна геометрії моделі. В ALE підході, який реалізовано в програмному забезпеченні, створено можливість перебудови SE сіток для конструктивного елемента, що аналізується.

Для визначення величини сили взаємодії ударника з пластиною використано підхід В. Гольдсмита-А.П. Філіппова, який полягає у розв'язанні рівняння руху для ударника з урахуванням коливань пластини, що деформується, та вдавлювання ударника. Для нього при пружному деформуванні застосовано закон Герца, в умовах пластичного деформування - степеневу форму залежності переміщення від сили.

При моделюванні удару поведінку матеріалу при високошвидкісному динамічному навантаженні описуємо пружно-пластичною моделлю Купера-Саймондса з швидкісним зміцненням та руйнуванням

$$\sigma_{TD} = \left[1 + (\dot{\epsilon} / D)^{1/k} \left(\sigma_T^0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p \right) \right] \quad (4)$$

де σ_{TD} – поточне значення межі текучості матеріалу; D , k – параметри матеріалу; σ_T^0 – початкове значення межі текучості; $\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ – швидкість деформації;

$E_p = E_t E / (E - E_t)$ - модуль зміцнення; E – модуль пружності першого роду (модуль Юнга);

E_t – дотичний модуль; β – параметр зміцнення; $\epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt$ – ефективна пластична

деформація, $\epsilon_{eff}^p < \epsilon_{max}^p$.

Змінюючи значення параметра зміцнення β , можливо отримати різні види зміцнення: при $\beta = 0$ – кінематичне зміцнення, при $\beta = 1$ – ізотропне, та при $0 < \beta < 1$ – комбінацію кінематичного та ізотропного зміцнення.

В роботі обґрунтовано розрахунково-експериментальний підхід для визначення констант рівнянь (4). Швидкість ударника враховується при чисельному розв'язанні задачі за допомогою алгоритмів МСЕ, з використанням моделі (4) та проведенням оцінки збіжності розв'язків. Для різних швидкостей ударника визначаються поля напружень в області удару, максимальні значення та відповідне еквівалентне напруження σ_e , яке для задач пластичної течії прийнято інтенсивністю напружень. Число циклів до пробивання визначається за кінетичним рівнянням виду $\dot{\varepsilon}^i = dN^{-b}$, $\sigma^i = gN^{-k}$, яке описує пластичну течію матеріалу при ударному навантаженні.

У **третьому розділі** надано опис створеної експериментальної установки для пробивання тонких пластин повторними ударами, наведену на рис. 1, де 1–пристрій фіксації пластин; 2–пристрій навантаження (індукційно-динамічний двигун (ІДД)); 3–блок живлення ІДД; 4–блок формування сигналів датчиків; 5–блок живлення установки; 6–пристрій захисту та сполучення; 7–аналогово-цифровий перетворювач; 8–осцилограф; 9–лінійний автотрансформатор.

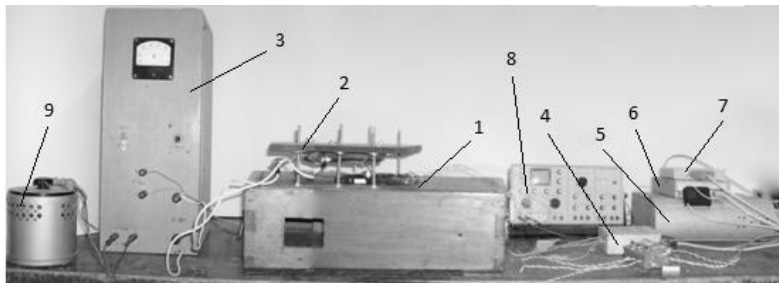


Рис. 1.

Тарировку установки здійснено із застосуванням сталеві кульки, що вільно падає, та ударника ІДД, при ударах по круглим та квадратним пластинам. Швидкість ударника регулювалася зміною електричної напруги на конденсаторі перетворювача за допомогою ІДД. У дослідженнях застосовано типовий ІДД, що входить до пристрою для запобігання несанкціонованого доступу до інформації на комп'ютерних дисках.

На пластині розміщено вимірювальну мережу з розеток тензодатчиків, сигнали з яких оброблялися блоками комплексу. Комплекс протестовано та визначено залежність швидкості ударника від електричної напруги, а також проведено тарування тензодатчиків за допомогою ступеневого навантаження та розвантаження еталонними грузами.

Характеристики матеріалу дисків визначено експериментально з діаграми розтягування плоских зразків та визначення твердості за Віккерсом. Для встановлення закономірностей пробивання за допомогою запропонованого розрахунково-експериментального підходу досліджувалися квадратні тест-пластини з матеріалу дисків та зі сталі 12X18H10T.

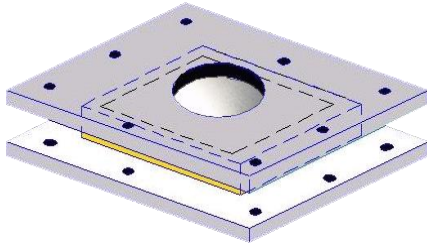


Рис. 2. Пристрій для закріплення зразка тест-пластини

Випробувались тест-пластин товщиною $H=1.5$ мм з листової сталі 12X18H10T та товщиною $H=1.6$ мм, вирізаних з дисків накопичувача на жорстких магнітних дисках (НЖМД).

Тест-пластини зі сталі 12X18H10T. Усього було протестовано 6 зразків тест-

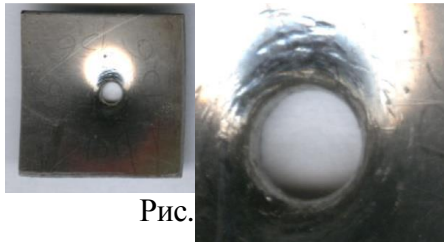
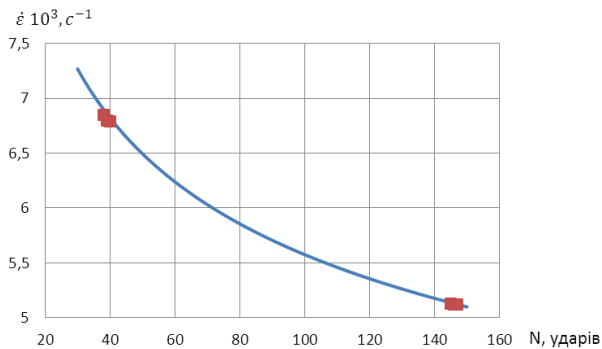
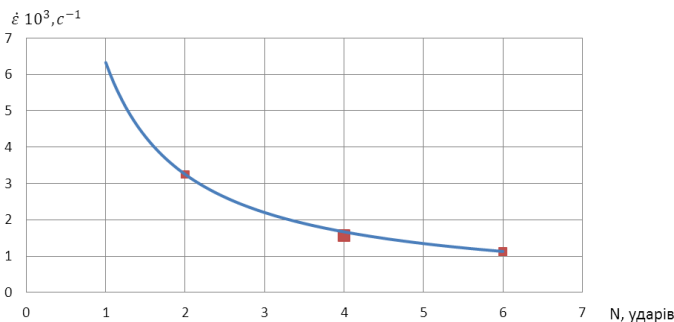


Рис.

наведено фотографію зразка, зруйнованого за 146 циклів навантаження при швидкості удару 7.7 м/с.

Тест-пластини з матеріалу комп'ютерного диску. Усього були протестовані



5

В експериментальній установці пластини закріплені на підкладці і стягнуті фіксатором (рис. 2), у верхній частині якого передбачено отвір для бойка. Повторні удари по тест-пластинам здійснювались ударником за умов, що удари відбуваються до руйнування зразка в одному й тому ж місці, до вибиття корку.

пластин (по 3 для двох швидкостей удару 7.7 м/с та 10.3 м/с). На рис.3 наведено розрахунково-експериментальну залежність швидкості деформацій від числа ударів до пробивання (суцільна лінія) та дані експериментів (точки).

Слід вважати встановленим експериментально, що процес пробивання відбувається внаслідок швидко-пластичної течії матеріалу тест-пластини. Визначено середні значення числа ударів до пробивання. Для першої групи дослідів, зі швидкістю удару 7.7 м/с, воно склало 146 ударів, а для другої, при 10.3 м/с – 39 ударів. При пробитті утворився корок діаметром 4 мм і товщиною 1.1 мм з рівними краями. На рис. 4

7 зразків - по 3 для трьох значень швидкості удару 5.2 м/с й 1.8 м/с та один контрольний при 2.5 м/с. На рис.5 наведено розрахунково-експериментальні залежності швидкості деформацій від числа ударів до пробивання. Середня кількість повторних ударів з вибиттям корку склало: для удару зі швидкістю

Результати експерименту відображено на рис. 6 (зліва направо): 2.5 м/с, 1.8 м/с, 5.2 м/с.



Рис. 6.

Поведінка при повторних ударах зразків тест-пластин, вирізаних з дисків НЖМД, не відрізнялась від того, що спостерігалось для сталевих: зразки також пробивались з утворенням корок діаметром ударника 4 мм. Разом з цим, кількість ударів, необхідна для пробивання, виявилась значно меншою.

Отримані експериментальні данні використані для розрахунків матеріальних постійних в законах динаміки пластичної течії при пробиванні: $\dot{\varepsilon}^i = dN^{-b}$, $\sigma^i = gN^{-k}$, $\sigma^i = \sigma_{TD}^i - \sigma_T^0$, $\sigma^i = A(\dot{\varepsilon}^i)^B$, $\sigma_{TD}^i = \sigma_T^0 [1 + (\dot{\varepsilon}^i / D)^{1/n}]$. Матеріальні постійні надані в таблиці 1.

Таблиця 1

Матеріал	σ_T^0 , МПа	B	D, с ⁻¹	g, МПа	K	N	B	A, МПа	D, с ⁻¹
сталь 12X18H10T	205	0.084	10403.5	490.56	0.13	0.644	1.55	$9.33 \cdot 10^{-5}$	12163
НЖМ диск	100	0.962	6329.32	117.05	0.059	16.43	0.06	7.58	$2.55 \cdot 10^{18}$

При ударному навантаженні квадратних пластин проводився запис сигналу з тензодатчиків. Після обробки та аналізу даних вимірювань отримано значення компонент деформованого стану в різних точках пластини.

За даними вимірювань остаточних деформацій побудовано об'ємні тривимірні моделі деформованих пластин, які дозволили провести порівняння експериментальних і чисельних результатів. Розподіл остаточних прогинів у диску після удару зі швидкістю 10.3 м/с надано на рис. 7.

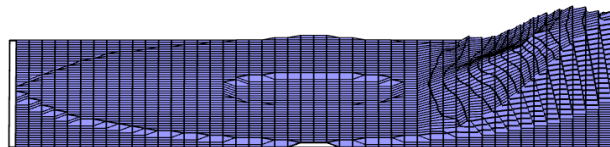


Рис. 7.

Також проведена серія експериментів по ударному руйнуванню накопичувачів в зборі, що пов'язано з дослідженням роботи перфоратора НЖМД «Унідиск».

При випробуваннях накопичувачі з дисками з алюмінієвого сплаву не були знищені з першого удару у зв'язку з недостатньою ємністю конденсатора установки. Такі диски ударно навантажувались декілька разів до повного пробивання. При дослідженнях виявлено, що максимальна швидкість ударника 11.5 м/с, яка визначена експериментально, виявилась вдвічі нижчою за прогнозовану при створенні пристрою.

У **четвертому розділі** надано результати чисельного моделювання з застосуванням МСЕ ударного деформування квадратних та круглих пластин, а також дисків накопичувачів у зборі. Порівняно чисельні та експериментальні дані.

У розрахунках у зв'язку з суттєвою трьохвимірністю задачі використовувалася об'ємна постановка. Пластини розбивалися на скінченні елементи як по сторонах, так і по товщині. Переважно для розбиття використовувався восьмивузловий об'ємний елемент. Розв'язувалась контактна задача, при розрахунках накопичувача в зборі і пластини на підкладці використовувалося кілька типів контактів. В задачах, в яких моделювалось використання ІДД, вважалось, що по пластині вдаряє циліндр, що не деформується, масою 0.429 кг та діаметром 4 мм. Після удару циліндр відскакує. Контакт діє на протязі усього часу розрахунку.

Для аналізу достовірності результатів виконано ряд тестових розрахунків. Порівнювалися різні типи сіток - рівномірні з різною кількістю елементів і згущені в точці контакту. Чисельні результати порівнювалися з точними та наближеними розв'язками, а також з отриманими в роботі експериментальними даними. Проведено розрахунки пластин при статичному і ударному навантаженні, встановлено задовільний ступінь достовірності. Так, наприклад, максимальні відмінності по напруженням у квадратній пластині у порівнянні з результатами розв'язання задачі С.П. Тимошенко для зосередженого навантаження не перевершували 4%. В задачах ударного навантаження різниця між чисельними і заміряними даними за деформаціями становила 18-23 %, а час досягнення максимальних деформацій визначався з точністю 1-2 %. Максимальні відмінності чисельних даних від вимірів за допомогою тензодатчиків по радіальних деформаціях в круглих пластинах магнітних дисках не перевершують 25 %. Результати розрахунку сили ударної взаємодії за допомогою спеціально розробленої програми якісно збігаються з даними, наведеними у монографіях В. Гольдсмита та Е.Г. Голоскокова й А.П. Филипова для шарнірно опертої квадратної пластини, а відмінності не перевершують 8 %.

Проведені чисельні дослідження ударного навантаження пластин зі швидкостями ударника, які призводять до виникнення пластичних деформацій. Розрахунками встановлено, що при максимально можливій в установці «Унідиск» швидкості удару 11.5 м/с найбільше значення інтенсивності напружень становить 282 МПа, що не призводить до миттєвого пробивання диску. В зв'язку з цим виникає задача повторного ударного навантаження до повного руйнування накопичувача.

За допомогою розробленої програми для пластин різних товщин визначені максимально можливі в установці «Унідиск» сили ударної взаємодії.

У роботі виконані чисельні дослідження ударного деформування круглих пластин і накопичувача на жорстких магнітних дисках у зборі, який розглядався як пластинчата конструкція.

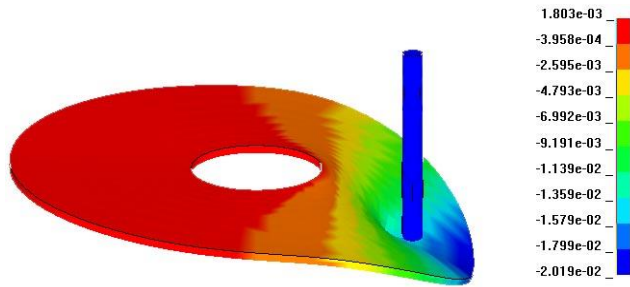


Рис. 8. Розподілення прогинів у диску після удару зі швидкістю 10.3 м/с

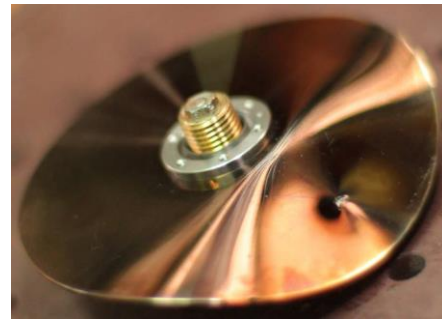


Рис. 9. Диск накопичувача після удару зі швидкістю 10.3 м/с

Проведено порівняння чисельного розв'язання задачі пружно-пластичного удару для граничного випадку відсутності нижньої кришки накопичувача, коли рівень прогинів та деформацій є максимальним (рис. 8), та замірів, виконаних у відповідному експерименті (рис. 9). Розрахунки якісно вірно описують складний профіль деформованого диска, кількісні відмінності в місці удару досягають 40%, а в інших областях не перевершують 25%. У цьому випадку в пластині мають місце великі деформації (до 64%), прогин перевищує 2 см.

Проведено чисельне моделювання ударів з різними швидкостями та знайдено значення, рівне 15 м/с, при якому пробивання відбувається з першого разу. Зроблено висновок, що модернізація приладу та досягнення розрахованої швидкості ударника дозволить зменшити час пробивання накопичувача.

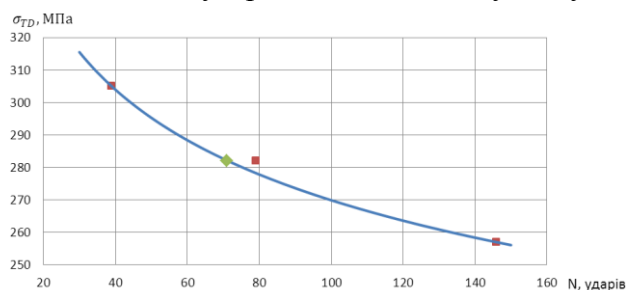
У цьому розділі наведені оцінки кількості ударів по тонких пластинах до їхнього пробивання. Проаналізовано результати моделювання процесу динамічної пластичної течії у квадратних шарнірно закріплених пластинах, виготовлених з хромонікелевої сталі 12X18H10T за умов дії ударника, що рухається з заданою швидкістю. По центру пластини зі швидкістю 10.3 м/с вдаряє циліндр, що не деформується. При побудові СЕ моделі використовувалась рівномірна сітка: 4 елементи по товщині, та 300x300 елементів у площині пластини, всього 45305 вузлів та 36000 елементів.

Розв'язок задачі проводився за допомогою карт швидкостей. Спочатку було розв'язано задачу однократного навантаження, та визначено час до відриву ударника від поверхні пластини. По закінченню часу контакту ударник відводиться у початкове положення. Після цього починається наступний цикл, що враховує НДС пластини після попереднього розрахунку. Проведення моделювання динаміки пружно-пластичного деформування пластини при повторних ударах пов'язано з великими витратами комп'ютерного часу. Так, наприклад для отримання даних для двох циклів навантаження знадобилось 3.5 години машинного часу при застосуванні процесору Intel Celeron Dual Core 3300. Подібні витрати не є припустимими при проведенні циклів розрахунків, які потрібні при проектуванні.

У зв'язку з цим для визначення числа повторних ударів до пробивання пластин застосовано методика, викладену у другому розділі. Для цього розглянуто зразок як пластину 30x30 мм товщиною 1.6 мм, закріплену на абсолютно твердій основі (підкладці). Пластину розбито трьохвимірними СЕ, 40 елементів на зовнішньому контурі поверхні та 4 елементів по товщині, всього сітка складається з 6400 елементів та 8405 вузлів.

Розглянуто дві подібні задачі, що відрізняються значеннями швидкості ударника, яка була задана в експериментах: 10.3 м/с та 7.7 м/с. При ударному навантаженні частка елементів під ударником руйнується, а у решті в зоні удару виникають пластичні деформації.

Розрахунками визначено максимальні значення інтенсивності остаточних напружень, які діють в області під ударником після закінчення ударного навантаження. Для швидкості ударника 10.3 м/с воно складає 305 МПа, для 7.7 м/с – 257 МПа. Проведені розрахунки дозволили встановити вплив інтенсивності напруження на кількість ударів до пробивання та вплив швидкості ударника на динамічну межу пластичності (рис. 10).



Відмінність розрахункових даних від експериментальних склала майже 12%. Розрахункове значення числа циклів до руйнування квадратної шарнірно опертої пластини, виготовленої зі сталі 12Х18Н10Т, зі швидкістю удару 10.3 м/с, склало 71 цикл, що відріз-

нається на 11% від експериментально визначеного числа 79.

Проведені експериментальні випробування та чисельне моделювання пробиття пристроїв НЖМД з конкретними обмеженнями за величиною електричної напруги на конденсаторі перетворювача ІДД, яка не може перевищувати 440-450 В, показали, що за один цикл ударного навантаження неможливо повністю знищити (пробити) магнітний диск, виконаний з алюмінієвого сплаву. У зв'язку з цим пристрій «Унідиск» має працювати у режимі повторного ударного навантаження.

Спочатку розглянуто задачу чисельного моделювання першого циклу ударного експерименту на зразках, вирізаних з самих магнітних дисків. Застосовано таку ж розрахункову схему, як й у випадку сталевих пластин. В якості об'єкту дослідження розглянуто квадратну пластину зі стороною 30 мм та товщиною 1.6 мм, що жорстко закріплено по контуру. Пластина знаходиться на основі, що не деформується, виготовлена зі слоїстого ортотропного матеріалу. Для отримання чисельного розв'язку побудовано скінченноелементну модель. Обрано тривимірну постановку задачі: 40 елементів на зовнішньому контурі поверхні та 4 елементи по товщині, всього SE сітка складається з 6400 елементів та 8405 вузлів.

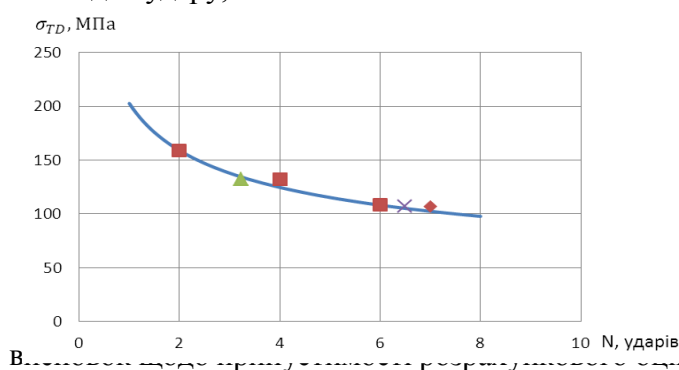
Розглянуто три подібні задачі, що відрізняються значеннями швидкості ударника, яка була задана в експериментах: 1.8 м/с, 2.5 м/с та 5.2 м/с. При ударному навантаженні в кожному з трьох випадків частка елементів під ударником руйнується, а у решті в зоні удару виникають пластичні деформації.

Розрахунками знайдено остаточні значення інтенсивності напружень, які характеризують цикл ударного навантаження: для швидкості 1.8 м/с – 112 МПа, для 2.5 м/с – 132 МПа, для 5.2 м/с – 159 МПа. Розрахункові результати надані на рис. 9. Експериментальні дані надано на цих рисунках точками.

Виконано розрахунки з застосуванням кінетичної теорії пластичної течії при повторних ударах. Значення числа ударів до пробивання для випадку швидкості

2,5 м/с склало 3.23 при інтенсивності напружень 132 МПа (трикутник на рис. 9). Відмінність між чисельним та експериментальним значенням 4 удара для цього рівня напружень складає 19%, що є припустимим для інженерних розрахунків. Залежність швидкості ударника та кількості ударів до пробивання від динамічної межі пластичності (алюмінієвий НЖМД) наведено на рис. 9.

Розглянуто розрахунок деформування та пробивання кільцевої пластини, закріпленої за внутрішнім контуром, при швидкості руху ударника 2.5 м/с, яка була реалізована в експерименті. Для використання методики визначення числа ударів до пробивання проведено розрахунок напружено-деформованого стану пластини при першому ударі. Результати розрахунку свідчать, що певна кількість СЕ під ударником руйнується, що відповідає експерименту – на першому циклі в місці удару було зафіксовано вм'ятину. Остаточне значення інтенсивності напружень у районі удару, визначене для моменту припинення коливань внаслідок удару, склало 107 МПа.



Ці дані застосовано для аналізу числа ударів до пробивання. Розрахунки дають значення 6.5 ударів (символ «X» на рис.11), що практично співпадає з експериментально визначеним числом 7 (ромб на рис. 11).

Проведене порівняння експериментальних та теоретичних чисельних результатів дозволило зробити

визначення числа ударів до пробивання пластин.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-практичної задачі – експериментальному та розрахунковому оцінюванню динамічних пружно-пластичних процесів в конструктивних елементах апаратури при ударі та пробиванні.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Створено та протестовано експериментальну установку з інформаційно-вимірювальним комплексом для реєстрації результатів дослідження динамічних пружно-пластичних процесів в конструктивних елементах апаратури при ударі та пробиванні. Визначено, що максимальна швидкість циліндричного ударника в установці становить 11.5 м/с. Експериментально визначені фізико-механічні характеристики матеріалу комп'ютерних дисків – алюмінієвого сплаву, вкритого з двох сторін сплавом заліза: модуль пружності $E=0.42 \cdot 10^5$ МПа, межа міцності $\sigma_b=195$ МПа та інші, констант матеріалу в законах пластичної течії, діапазонів змінювання значень межі пластичності - від 195 МПа до 100 МПа.

Отримані данні з достовірності результатів, досліджено властивості динаміки пружно-пластичного деформування й руйнування квадратних, круглих пластин, дисків НЖМД при повторних ударах та пробиванні.

Експериментально встановлені закономірності деформування та руйнування пластин, для діапазону швидкостей ударника ІДД визначено можливості його ефективної роботи при одноразовому чи багаторазовому пробиванні.

При дослідженнях виявлено причину незадовільного прогнозу функціонування пристрою «Унідиск» - максимальна швидкість ударника 11.5 м/с, яка визначена експериментально, виявилась вдвічі нижчою за прогнозовану виробником.

2. Проведено експериментальні дослідження та встановлено закономірності ударного деформування, пробивання квадратних і круглих пластин – магнітних комп'ютерних дисків. Визначено максимальні значення сил ударної взаємодії при ударах по пластинах за допомогою ІДД.

3. Запропоновано та експериментально обґрунтовано для сталі 12Х18Н10Т та матеріалу комп'ютерних дисків застосування розрахункового скінченно-елементного методу за комбінованим підходом Лагранжа - Ейлера для дослідження динамічних пружно-пластичних процесів в конструктивних елементах апаратури при повторних ударах до пробивання.

4. Обґрунтовано розрахунково-експериментальний підхід для оцінювання швидкості ударника та кількості ударів до пробивання, який засновано на експериментальних даних матеріалів тест-пластин та розрахунках методом скінченних елементів напруженого стану до повного пробивання тонкостінних елементів приладів та машинобудівних конструкцій.

5. Виконано чисельні розрахунки та встановлено закономірності деформування та руйнування тонких квадратних пластин, магнітних дисків й пластинчатої конструкції НЖМД при ударному навантаженні.

Встановлено потрібну для одноразового пробивання швидкість ударника, яка дорівнює 15 м/с, та визначено, що при пробитті захисного верхнього шару і швидкості ударника - 2.5 м/с кількість ударів до повного пробиття складо 7 ударів. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними складає менш ніж 15...20%.

6. Результати експериментальних та чисельних досліджень, оцінки, висновки та рекомендації використані в ТОВ «ТЕТРА, LTD» при модернізації та проектуванні нових моделей перфоратора «Унідиск».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наумов И.В. Экспериментальное исследование процессов ударного нагружения тонких пластин / Д.В. Бреславский, И.В. Наумов, А.В. Онищенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №38. – С. 30-35.

Здобувачу належить проектування та виготовлення інформаційно-вимірювального комплексу для проведення експериментальних досліджень.

2. Наумов І.В. Експериментальне дослідження руйнування тонких пластин / Д.В.Бреславський, І.В. Наумов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №42. – С. 25-28.

Здобувачу належить розробка нових модулів інформаційно-вимірювального комплексу для проведення експериментальних досліджень.

3. Наумов И.В. Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником / И.В. Наумов, В.Ф. Боллох, Д.В. Бреславский // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – №1. – С. 207-216.

Здобувачу належить розробка методу, алгоритму та проведення розрахунків удару циліндром по пластинах.

4. Наумов И.В. Исследование поведения тонких прямоугольных пластин при ударном нагружении / Д.В.Бреславский, И.В.Наумов, А.В.Онищенко. // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Дніпропетровськ: ДНУ імені Олеса Гончара, «Ліра», 2011. – Вип. 16. – С. 51-59.

Здобувачу належить створення експериментальної установки та проведення експериментів з ударного деформування пластин.

5. Наумов І.В. Розрахунково-експериментальний підхід для аналізу пошкоджуваності при ударному малоцикловому навантаженні / Д.В.Бреславський, І.В.Наумов, О.А.Татарінова, А.В.Кипенський // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 50. – С. 33-38.

Здобувачу належить проведення експериментів з повторного навантаження та створення розрахунково-експериментального підходу для аналізу руйнування.

6. Наумов И.В. Экспериментальные исследования деформирования и разрушения пластин при повторном ударном нагружении [Электронный ресурс] /Д.В.Бреславский, И.В.Наумов // Инженерный вестник Дона. Электронный научный журнал. – 2012. – №4. – Ч. 2. – Режим доступа до журналу:

<http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1426>

Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень плоских зразків з матеріалу накопичувачів.

7. Наумов И.В. Анализ разрушений панелей летательных аппаратов при ударном нагружении / Д.В. Бреславский, В.Н. Конкин, А.В. Онищенко, И.В. Наумов // V Міжвуз. наук.-практ. конф. “Можливості використання методів механіки для розв’язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій”. – Харків, 2006. – С. 26.

Здобувачу належить розробка пристрою навантаження для проведення ударних випробувань.

8. Наумов И.В. Экспериментальное исследование разрушения тонкостенных элементов конструкций при ударном нагружении / Д.В. Бреславский, И.В. Наумов, В.Н. Конкин // VII Міжвуз. наук.-практ. конф. “Можливості використання методів механіки для розв’язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій”. – Харків, 2008. – С. 13-14.

Здобувачу належить розробка інформаційно-вимірювального комплексу.

9. Наумов І.В. Експериментальне дослідження руйнування тонкостінних елементів конструкцій при ударі / І.В. Наумов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 травня 2009 р.: у 2 ч. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – С. 74.

Здобувачу належить проведення розрахунків ударного навантаження квадратних пластин.

10. Наумов І.В. Розв'язок задачі руйнування диска накопичувача при наскрізному пробиванні циліндричним ударником / І.В. Наумов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., 12-14 травня 2010 р.: у 4 ч. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – С. 74.

Здобувачу належить постановка задачі, метод та алгоритм розв'язання задачі та експериментальне дослідження властивостей матеріалу.

11. Naumov I. Numerical and experimental investigations of fracture in thin-walled structures at impact loading. / D. Breslavsky, I. Naumov, A. Onyshchenko // Nonlinear dynamics - 2010: Proceedings of the 3rd International Conference, September 21-24, 2010. – Kharkov: NTU "KhPI", 2010. – P. 278-283.

Здобувачу належить проведення експериментів та розрахунків удару циліндром по пластинах.

12. Naumov I. Impact cyclic damage and fracture in thin plates. / D. Breslavsky, I. Naumov, A. Onyshchenko // 7th International Symposium on Impact Engineering. – Warsaw, Poland, 2010. – P. 28.

Здобувачу належить проведення експериментів з руйнування НЖМД та проведення експериментів при однократних та повторних ударах.

13. Наумов І.В. Разрушение тонкостенных конструкций при ударе / Д.В. Бреславский, В.Н.Конкин, И.В. Наумов // Матеріали ІХ міжвузівської науково-практичної конференції «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» - Харків: НУЦЗУ, 2010. – С. 3

Здобувачу належить проведення розрахунків ударного навантаження квадратних пластин.

14. Наумов І.В. Дослідження руйнування пластини накопичувача на жорстких магнітних дисках при ударному навантаженні / І.В. Наумов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XX міжнар. наук. - практ. конфер., 15-17 травня 2012р.: у 4 ч. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 71.

Здобувачу належить проведення розрахунків повторного ударного навантаження квадратних зразків з різних матеріалів.

15. Наумов І.В. Моделирование упруго-пластического деформирования тонкостенных конструкций / В.А. Метелев, И.В. Наумов // Математические методы в технике и технологиях –ММТТ-25 [текст]: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т.3. – Волгоград: Волгогр.гос. техн. ун-т, 2012. – С. 74-76.

Здобувачу належить розроблення алгоритмів та проведення розрахунків пружно-пластичного деформування тонкостінних елементів.

АНОТАЦІЇ

Наумов І.В. Експериментальне та розрахункове оцінювання динамічних процесів в конструктивних елементах апаратури при ударі та пробиванні. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2013.

Надано постановку, описано метод та алгоритми розв'язку задачі динаміки та пробивання при ударі тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій, приладів та апаратури при ударних навантаженнях.

Викладено опис спроектованого та виготовленого експериментального комплексу для дослідження деформованого стану тонкостінних елементів конструкцій при їх ударному навантаженні.

В роботі виконано цикл експериментальних досліджень з визначення деформованого стану та руйнування при пробиванні ударно навантажених квадратних, круглих пластин та накопичувачів на жорстких магнітних дисках (НЖМД). Встановлено межі зміни сили ударної взаємодії.

Проведено чисельні розрахунки та виконано порівняння результатів тестових задач з аналітичними розв'язками та експериментальними даними. Описано результати експериментів з повторного ударного навантаження матеріалу, з якого виготовлені пластини, та самих пластин. Отримано розрахунково-експериментальні криві залежності швидкості деформації та інтенсивності напружень від числа ударів до пробивання. Чисельно та експериментально знайдено число ударів до пробивання квадратних пластин, комп'ютерних дисків та НЖМД у зборі. Показано можливість застосування розробленого підходу до оцінювання числа ударів до пробивання пластин.

Ключові слова: удар, пробивання при ударних навантаженнях, пластини, тонкостінні елементи конструкцій, МСЕ, експериментальні дослідження, НЖМД.

Наумов И.В. Экспериментальное и расчетное оценивание динамических процессов в конструктивных элементах аппаратуры при ударе и пробивании. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2013.

В диссертационной работе приведена математическая постановка задачи, методы и алгоритмы решения задачи ударного нагружения тонкостенных элементов машиностроительных конструкций, приборов и аппаратуры.

На базе метода конечных элементов и теории пластического течения создан обобщенный расчетный подход для оценивания деформирования и пробивания тонкостенных конструктивных элементов аппаратов и приборов при ударе.

Изложено описание спроектированного и изготовленного экспериментального комплекса для исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных элементов конструкций при их ударном нагружении, включающего информационную измерительную систему, устройство закрепления и нагружения.

Экспериментально получены физико-механические характеристики материала дисков накопителей на жестких магнитных дисках.

В работе выполнен цикл экспериментальных исследований, направленных на тарировку отдельных узлов и исследовательского комплекса в целом. Описаны результаты экспериментального определения деформированного состояния ударно нагруженной шарнирно закрепленной квадратной пластины. Путем сравнения с приближительным аналитическим решением установлены границы изменения силы ударного взаимодействия для конкретного электромагнитного преобразователя, с применением которого проводится ударное нагружение. Для двух исследованных материалов экспериментально получены зависимости числа ударов до разрушения от скорости ударника.

Выполнен цикл численных расчетов и проведено сравнение результатов с аналитическим решением и экспериментальными данными. Рассмотрены квадратные пластины и магнитные диски под действием статической и ударной нагрузки при разных скоростях ударника.

Описаны результаты экспериментов по повторному ударному нагружению материала, из которого изготовлены пластины, и самих пластин. Обсуждается разработанный расчетно-экспериментальный подход, позволяющий по определенным опытным путем зависимостям между скоростью ударника и числом циклов до полного пробивания получать кривые зависимости интенсивности напряжений от числа ударов до пробивания. После их обработки определены материальные постоянные для кинетического уравнения. Найдено число циклов до разрушения, совпадающее с определенным экспериментально.

Для пластин из двух материалов показана возможность численного определения числа циклов до разрушения при повторном ударном нагружении.

Ключевые слова: удар, пробивание при ударном нагружении, пластины, тонкостенные элементы конструкций, МКЭ, экспериментальные исследования, НЖМД.

Naumov I.V. Experimental and numerical estimation of dynamic processes in hardware structural elements under impact and punching. With manuscript rights.

Thesis for candidate of technical sciences degree by speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2013.

The mathematical problem statement, method and algorithms of solution for the problems of dynamics and impact punching of thin-walled structural elements of machines and hardware under impact loading are described.

The description of designed and developed experimental complex for investigations of deformed state of thin-walled structural elements under impact loading is presented. The series of investigations on the determination of deformed state and fracture due to

punching in impact loaded square and round plates as well as computer hard disk drives (HDD) had been done. The limits of impact interaction load values were determined.

The numerical calculations were performed and comparison between test examples data as well as analytical solutions and experimental results had been done. The results of experiments on repeated impact loading of materials and plates are described. Numerical-experimental curves of dependencies between strain rates as well as von Mises equivalent stresses and the number of impacts up to punching were obtained. The numbers of impacts up to punching for square, round plates and HDD were determined by experimental and numerical way. The possibility of use of developed approach for estimation of the number of impacts up to punching was shown.

Keywords: impact, punching at impact loading, plates, thin-walled structural elements, FEM, experimental investigations, HDD.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive letter 'S' followed by a horizontal line extending to the right.

Наумов Іван Володимирович

Експериментальне та розрахункове оцінювання динамічних процесів в конструктивних елементах апаратури при ударі та пробиванні

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
к.т.н., доц. Татарінова О.А.

Підписано до друку 16.10.2013 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 22

Надруковано у ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво В04 № 022953 від 24.04.2003 р.
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1