

**Слащук О.О.,  
Заспа Ю.П.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна  
E-mail: Slashchuk.O@ukr.net

## ВНУТРІШНІЙ СИНТЕЗ РУХУ ІЗ ЗАДІЯННЯМ РІЗНИХ СТЕПЕНІВ ВІЛЬНОСТІ НА ПРИКЛАДІ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

УДК 621:531.4:531.1:531.3:534.4

На прикладі пружного удару металевих куль акустоемісійним та електророзрядним методами досліджена контактна взаємодія механічних тіл. Встановлено що ударний процес проходить в декілька етапів: інтенсивній ударній взаємодії передують досить тривала перед-ударна фаза, яка зароджується на межі шорсткості контактуючих поверхонь і здатна впливати на зміну форми руху.

**Ключові слова:** удар, час удару, синтез руху, контактна взаємодія.

### Вступ

Ударна взаємодія є невід'ємним елементом в системах динамічного тертя, де домінують інерційні навантаження та нестационарні контактні реакції [1], тому розглядати її за спрощеною схемою закону збереження механічної енергії [2] недостатньо. Окремі аспекти динамічної взаємодії при ударах розглядалися в роботах 3, 4.

### Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є встановлення механізмів внутрішнього синтезу руху в процесі ударної контактної взаємодії.

### Експериментальна частина

На практиці час удару можна визначити дослідним шляхом, використавши установку, що показана на рис. 1, де тілами контакту є сталеві кулі.

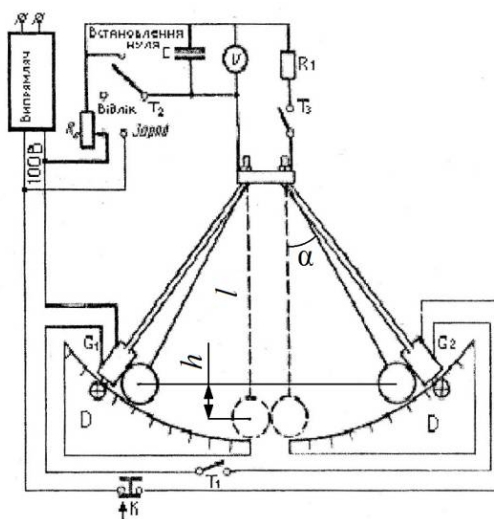


Рис. 1 – Схема лабораторної установки [5]

В установці сталеві кулі масою 206 гр кожна утримуються на струні в відведеному стані за допомогою електромагнітів. Після припинення подачі струму на електромагніти кулі починають рухатися назустріч аж до удару. Розрахувати швидкість зіткнень можна за формулою:

$$v = \alpha \sqrt{g \cdot l}, \quad (1)$$

де кут  $\alpha$  представлений у радіальній мірі;

$l$  – довжина підвісу;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Якщо кулі увімкнуті в коло, що має опір  $R$  і конденсатор ємністю  $C$ , заряджений до напруги  $U_0$ , то в момент зіткнення куль конденсатор буде розряджатися за експоненціальним законом:

$$U = U_0 \cdot e^{-\frac{\tau \cdot n}{R \cdot C}}. \quad (2)$$

Спад напруги на конденсаторі може бути пов'язаний з часом зіткнень куль таким чином [5]:

$$\tau = \frac{R \cdot C}{n} \cdot \ln \frac{U_0}{U_n}, \quad (3)$$

де  $U_n$  – напруга на конденсаторі після  $n$  зіткнень куль;

$U_0$  – початкова напруга.

### Результати експерименту та їх обговорення

В умовах експерименту кут  $\alpha$  становив 5.8 градусів, опір мережі  $R = 1000$  Ом, ємність конденсатора  $C = 4 \cdot 10^{-6}$  Ф, початкова напруга конденсатора  $U_0 = 100$  В, кінцева напруга  $U_n = 50..70$  В після 10..20 ударів. Спеціальних мір для центрування удару не здійснювалось, що власне і визначало характер внутрішнього синтезу руху в процесі удару.

Розрахувавши значення часу за формулою (3), отримаємо:  $\tau = (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$  с.

Для перевірки даного значення можемо скористатися формулою Г. Дерисевича [6], який розглядав сталеві кулі ідеально пружними. За такого представлення відсутнє тертя, а енергією, яка переходить в хвильовий рух, можна нехтувати. За таких умов деформації тіл абсолютно зворотні. Тоді загальний час удару можна вирахувати за наступною формулою [7]:

$$T_c = 2,87(m^2 / r \cdot E^* \cdot v)^{1/5}, \quad (4)$$

де  $r = 19$  мм – радіус куль;

$E^*$  – приведений модуль пружності, що розраховується за формулою:

$$E^* = \left[ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

де  $\nu_1, \nu_2$  – коефіцієнти Пуассона матеріалу куль,

$E_1, E_2$  – модулі Юнга.

Дана формула є результатом квазістатичної теорії контакту, запропонованої Герцом. Ця теорія являється квазістатичною в тому розумінні, що деформації вважаються зосередженими в зоні контакту і визначаються статичною теорією: хвильовим рухом в тілах нехтують і передбачається, що кожне тіло в будь який момент часу рухається зі швидкістю його центра ваги. Розрахунок за формулою (4) дає результат  $T_c = 1,4 \cdot 10^{-4}$  с.

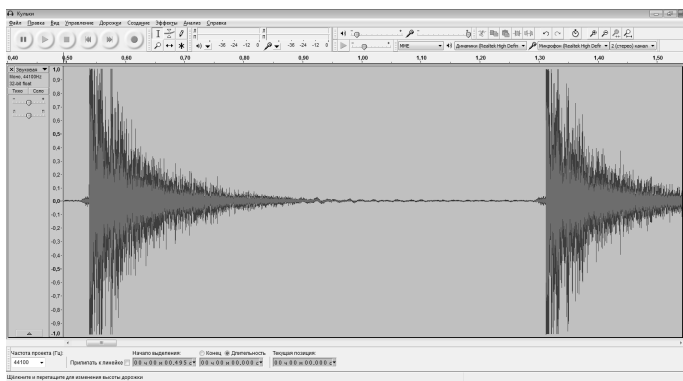


Рис. 2 – Акустограма двох пружних ударів

Розглядаючи динаміку ударів на основі отриманих акустограм, можна прийти до висновку, що контакт проходить в декілька етапів. Акустограма (рис. 2) демонструє зародження так званого перед-удару, який випереджає кожен окремий удар.

При збільшенні масштабу акустограми (рис. 3) видно межі перед-удару, який триває  $\approx 1,6 \cdot 10^{-2}$  с, на противагу основному удару, що триває  $\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$  с. Зародження ударної взаємодії пояснюється початком дотику тіл на границі шорсткості, де починає проходити пластична деформація в зоні майбутнього контакту.

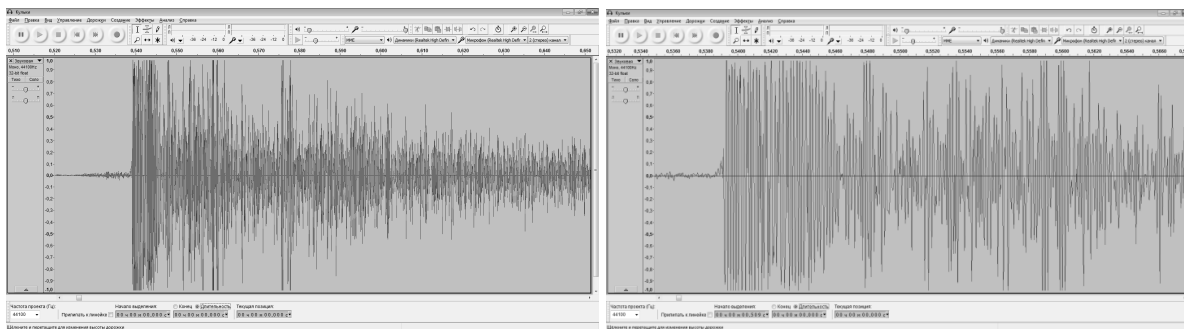


Рис. 3 – Акустограма удару при збільшенні масштабу

Перед - удар здійснюється на основі обертальних степенів вільності, що являються інерційнішими за поступальні рухи зближення. При цьому інерційність таких рухів є наслідком того, що моменти контактних реакцій відносно малі, з огляду на малі ділянки контакту [8].

Такий досить тривалий проміжок часу перед-удару не фіксується електророзрядним методом. Це можна пояснити недостатністю такої взаємодії для руйнування поверхневої оксидної плівки металевих об'єктів [9]: таким чином заряд просто не стікає з конденсатора.

І все ж, перед - ударна фаза не здатна повністю змінити напрямку руху куль. Первинний контакт носить випадковий характер. Після його встановлення триває процес підвертання куль до основного удару, час якого збігається і з математичними розрахунками, і з результатами дослідів. Умовно кажучи, синтез руху напрямлений на найдовше відхилення (відтягування) удару.

На рис. 4 показаний спектр контактно-наведеної акустичної турбулентності, що виникає в матеріалі куль в результаті ударів.

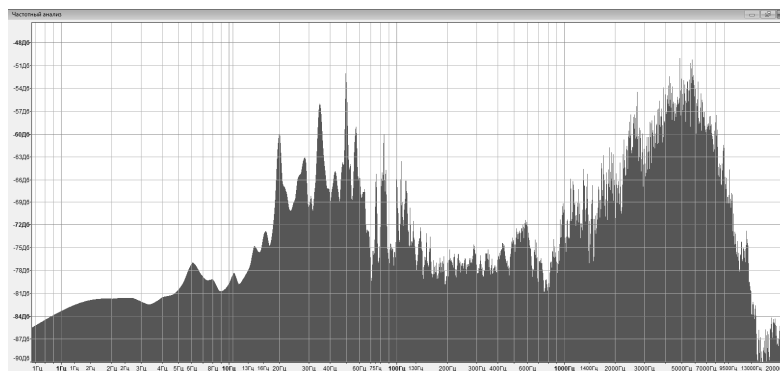


Рис. 4 – Спектрограма удару

Максимум спектру  $\approx 6000$  Гц відповідає часовому параметру  $\approx 1,7 \cdot 10^{-4}$  с, що вельми близько до отриманих вище експериментальних та розрахункових результатів для основної стадії удару.

Основна частина спектру зміщена в довгохвильову область, що є результатом каскадних процесів переносу енергії в системах динамічної контактної взаємодії [10].

## Висновки

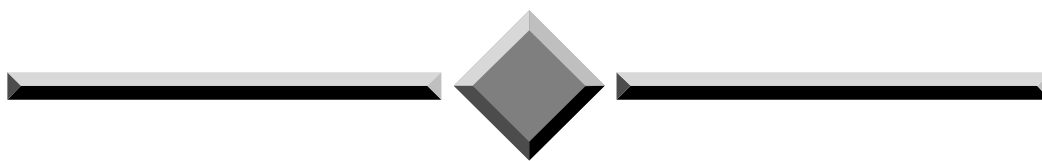
В ході дослідження встановлений реальний час ударів пружних тіл. Данні підтвердженні трьома методами, де час удару розраховувався математичним шляхом, за допомогою електричного розряду та аналізу спектру звуку. Встановлено, що кожен удар проходить в декілька етапів, причому зародження удару відбувається на межі шорсткості контактуючих поверхонь. Основному передчасному інтенсивно-

му удару передує значно триваліша перед-ударна фаза. Наявність цієї фази обумовлена неідеальним центруванням удару, що характерно для реальних технічних систем контактної взаємодії. Внутрішній синтез руху в процесі динамічної ударної взаємодії забезпечується наявністю різноманітних степенів вільності контактуючих тіл.

### Література

1. Дорофеев О.А. Влияние удара на кинематичні та динамічні характеристики машин швейного та взуттєвого виробництва. / Дорофеев О.А., Терещенко О.П. Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – №2. – С. 171-174.
2. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики / Никитин Н.Н., Добронравов В.В. – Лань, Изд. 7. – 2010.
3. Павленко Ю. Г. Лекции по теоретической механике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
4. Голубева О.В. Теоретическая механика. Изд-во. «Вісшая школа» 30 л., Изд. 2. – Москва. – 1968.
5. Голоножка В. М. Загальна фізика. Методичні вказівки до лабораторних робіт. Частина 1 / Голоножка В.М., Костишина Г. І. – Хмельницький: ТУП. – 2001.
6. Deresiewicz H. A note to Hertz impact. – Acta Mechanica, 1968, V. 6, p. 108-112.
7. Johnson K. Contact mechanics / Cambridge University Press, 1987. p. 353.
8. Физика бистропротекающих процессов. Сб. науч. трудов / Под. ред. Н. А. Златина. – М.: Мир. – 1971. – С. 251-253.
9. Колесников В. И. Влияние строения и свойств оксидных пленок на поверхности железа и его сплавов на протекание коррозии металлов. / Колесников В. И., Бойко М. В., Булгаревич С. Б., Акимова Е. Е. – Вестник южного научного центра РАН. – Т. 3. – №1. – 2007. – С. 10-15.
10. Заспа, Ю.П. Каскадный транспорт енергії збурень в системах динамічної контактної взаємодії. / Ю. П. Заспа, С. Г. Костогриз – Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 1. – С. 47-52.

Поступила в редакцію 17.06.2016



**Проблеми трибології**  
**“Problems of Tribology”**  
**E-mail: tribosenator@gmail.com**

Slashchuk O. O., Zaspа Yu. P. **The internal motion synthesis with the employment of different degrees of freedom on example of collision.**

Collision interaction is an integral part of dynamic friction system where inertial load and unsteady contact reactions are dominate. So, it cannot be seen in terms of a simplified scheme of the law of conservation of mechanical energy.

The aim of this work is to establish internal mechanisms of synthesis movement of collision process during contact interaction.

The experimental results show the real time of collision with two elastic bodies. Results confirmed by three methods where time was identified by math, by electric discharge method and by analysis of sound spectrum. Found that every collision takes place in several stages. Impact origin is on the verge of roughness of the contacting surfaces. Pre-collision phase present before collision and lasts much longer than main collision. Pre-collision has based on rotational degrees of freedom. It are more inertia for reciprocating motion.

This fairly long period of time of pre-collision can not be measured by electric discharge method. This can be explained by not destroyed oxide layer of metal balls. By this oxide layer some electric voltage on capacitor does not consumed.

The presence of this phase is due not perfect centering collision which is characteristic of the real engineering systems of contact interaction. Domestic synthesis of movement in dynamic collision interaction provided by the presence of various degrees of freedom of contacting bodies.

**Keywords:** collision, collision time, synthesis of movement, contact interaction.

### References

1. Dorofiev O.A. Vplyv udaru na kinematychni ta dynamichni kharakterystyky mashyn shveinoho ta vztutievoho vyrobnytstva. / Dorofiev O.A., Tereshchenko O.P. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, №2, 2016, S.171-174.
2. Nykytyn N.N. Kurs teoretycheskoi mekhanyky. / Nykytyn N.N., Dobronravov V.V. Lan, Yzd. 7., 2010.
3. Pavlenko Iu. H. Lektsyy po teoretycheskoi mekhanyke. M.: FYZMATLYT, 2002.
4. Holubeva O.V. Teoretycheskaia mekhanyka. Yzd-vo. «Visshaia shkola» 30 l., Yzd. 2., Moskva, 1968.
5. Holonozhka V. M. Zahalna fizyka. Metodychni vkazivky do laboratornykh robit. Chastyna 1. Holonozhka V.M., Kostyshyna H. I. Khmelnytskyi: TUP, 2001.
6. Deresiewicz H. A note to Hertz impact. Acta Mechanica, 1968, V. 6, p. 108-112.
7. Johnson K. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. p. 353.
8. Fyzyka bystroprotokaiushchykh protsesov. Sb. nauch. trudov. Pod. red.. N. A. Zlatyna. M.:Myr. 1971, S.251-253.
9. Kolesnykov V. Y. Vlyaniye stroeniya y svoistv oksydnykh plenok na poverkhnosty zheleza y eho splavov na protokanye korrozyy metallov. Kolesnykov V. Y., Boiko M. V., Bulharevych S. B., Akymova E. E. Vestnyk yuzhnoho nauchnoho tsentra RAN, T. 3., №1, 2007, s. 10-15.
10. Zaspа, Yu.P. Kaskadnyi transport enerhii zburen v systemakh dynamichnoi kontaktnoi vzaiemo-dii. Yu. P. Zaspа, S. H. Kostohryz. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2015. № 1. S. 47-52.