

УДК: 539.4

**О.С. Поліщук***Хмельницький національний університет***ПРОЦЕС ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ПРИ УДАРНОМУ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

*Розглянуто питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа.*

*Ключові слова:* ударник, робочий інструмент, матеріал, удар, операції легкої промисловості.

**О.С. Полищук****ПРОЦЕСС ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПРИ УДАРНОМ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Рассмотрены вопросы о процессах и явлениях, возникающих в системе ударник машины - рабочий инструмент - материал - основа.*

*Ключевые слова:* ударник, рабочий инструмент, материал, удар, операции легкой промышленности.

**O. Polishchuk****THE PROCESS OF ENERGY TRANSFERRING WHILE SHOCK PERFORMANCE OF LIGHT INDUSTRY OPERATIONS**

*The issue of processes and phenomena that arise in such system as: machine drummer - working tool - material - basis is considered.*

*Keywords:* drummer, working tool, material, kick, of light industry operations.

**Постановка проблеми.**

Під ударом розуміють сукупність явищ, що виникають при зіткненні тіл і супроводжуються повним або частковим переходом кінетичної енергії в їх деформації. Вивчати удар почали з часів Леонардо да Вінчі; цим займалися Галілей, Ньютон, Гюйгенс, Декарт, Маріон, Лейбніц. Вони розглядали процес динамічної взаємодії двох тіл як миттєвий процес і оцінювали лише кінцевий результат удару - зміну швидкостей тіл. Декарт ввів поняття кількості руху. Ньютон сформулював основні закони механіки, розглянув пружний і непружний удар, ввів поняття коефіцієнта відновлення енергії при ударі. Гюйгенс сформулював закон збереження імпульсу при контактній взаємодії тіл [1].

Тривалість удару зазвичай дуже мала і на практиці лежить в діапазоні від декількох десятитисячних до мільйонних часток секунди ( $10^{-4}$  -  $10^{-6}$  с). Ударні сили, що розвиваються в місці контакту тіл змінюються за час удару в широких межах і можуть досягати значень, при яких середні тиски на площадках контакту становлять  $10^9$  -  $10^{10}$  Па (десятки і сотні тисяч атмосфер). Дія ударних сил призводить до значних змін швидкостей точок тіл. Наслідками удару можуть бути також залишкові деформації, пружні (звукові) коливання, нагрівання тіл, зміна механічних властивостей їх матеріалів та ін.

Очевидна вигода руйнування ударом обумовлена можливістю трансформувати кількість руху ударника в імпульс великої сили [2]. Це пояснює широке використання ударних машин в різних галузях промисловості. В теперішній час явище удару використовується в ударно-механічному устаткуванні для виконання різноманітних операцій.

Швейна, взуттєва, трикотажна і шкіргалантерейна галузі легкої промисловості мають специфічні технологічні операції, що відрізняють одну галузь від іншої, але широко використовуються операції, аналогічні для всіх галузей і виконуються вони на обладнанні (пресах) зі зворотним - поступальним рухом робочих органів. До таких операцій можна віднести: вирубання та перфорацію деталей взуття та одягу; клеймування і маркування; встановлення і закріплення металевої фурнітури і т.п. Всі операції припускають взаємодію робочих органів пресів з матеріалами, що мають різні фізико - механічні властивості. Взаємодія носить ударний характер: в окремих випадках виконавчий орган преса повинен розрізати матеріал або зробити в ньому отвори, а в інших залишити слід на поверхні (тиснення) не руйнуючи поверхню матеріалу. Процес руйнування матеріалу здійснюється одиничним ударом, що передається через проміжну ланку робочий інструмент. Робочий інструмент (різак, пробійник) занурюється в матеріал під дією хвилі напруження після удару по ньому робочого органу пресу.

Ударний ефект при виконанні даних операцій в основному досягається на устаткуванні, що використовує пневматичний, гідравлічний, електромеханічний приводи. Актуальним питанням є процес передачі енергії при ударному виконанні вище зазначених операцій на пресовому обладнанні з використанням двигунів на основі безпосереднього перетворення електричної енергії в механічну енергію руху робочих органів. Таке перетворення електричної енергії може бути здійснено за допомогою лінійних електродвигунів різного типу, які теж почали використовуватися для виконання даних операцій та яких робочий орган переміщується з більшою швидкістю [3, 4].

Виходячи з вище викладеного можна констатувати, що процес ударного виконання операцій легкої промисловості є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Явище удару широко використовується при виконанні технологічних операцій в різних галузях промисловості. Цим пояснюється велика кількість наукових праць, присвячених дослідженням різних аспектів цього питання, починаючи від сутності процесу зіткнення твердих тіл і закінчуючи теорією взаємодії робочих інструментів з матеріалами і їх ударного руйнування.

Вивчення ударних процесів відноситься до числа найбільш актуальних проблем механіки, пов'язаних з оцінкою поведінки робочих інструментів і матеріалів в умовах дії імпульсних навантажень.

Повздовжньому удару стержнів присвячені роботи Тимошенко С.П., Бержерона Л., Динника О.М., Бідермана В.Л., Кільчевського М.О., Гольдсмита В., Пановко Я.Г. та інших.

Руйнуванню матеріалів ударною дією та вивченню поздовжніх коливань в машинах ударної дії присвячені роботи Алабушева П.М., Александрова Є.В., Манжосова В.К., Саруєва Л.А., Тагаєва Б.Т., Шапошнікова І.Д., Саймона Р. та інших [5].

**Постановка завдань.** В останні роки з'явилася багато нової інформації, що розширює межі пізнання процесів зіткнення, передачі енергії через проміжні елементи, ударного руйнування матеріалів завдяки створенню більш досконалого експериментального обладнання. Розроблені методики розрахунку ударних систем, що складаються із декількох елементів різних конфігурацій, і способи їх експериментальної перевірки. Все це значно просунуло вперед теорію ударного руйнування різних матеріалів і дозволило вирішити ряд важливих практичних задач, що стосуються, зокрема, конструювання ударних машин і робочих інструментів [2].

Тому постає задача узагальнення накопиченого досвіду, використовуючи і власний, з метою створення єдиної прикладної теорії розрахунку ударних систем для виконання операцій легкої промисловості, так як в технічній літературі відсутні відомості стосовно їх виконання в ударному режимі. З використанням явища удару в легкій промисловості можна виконувати наступні операції: вирубування деталей для взуття, одягу та шкір-галантерейних виробів; виконання перфорації на деталях; пробивання отворів під металеву фурнітуру; закріплення металевієї фурнітури; забивання закріплювачів в матеріал; виконання операції тиснення візерунків на деталях; виконання операції клеймування та маркування на деталях та виробках тощо.

Необхідно розглянути питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа (вирубна плита), а саме: привести загальну уяву про зіткнення елементів; розглянути процес передачі енергії при виконанні різних технологічних операцій. Причому елементи, що стикаються і передають удар (ударник з прикріпленим робочим інструментом; ударник - робочий інструмент і ударник – закріплювач) і матеріал (деталь) будуть розглядатися як система, в якій від кожної ланки залежить кінцевий результат її функціонування (приклад систем: ударник – робочий інструмент – матеріал при виконанні операції вирубування деталей). Цілеспрямованість системи обумовлює призначення і параметри її ланок. Так, для виконання операції вирубування деталей в приведеній системі найбільш ефективним способом потрібно: передати енергію від ударника пресового устаткування до матеріалу з як найменшими втратами енергії; використати енергію удару на руйнування матеріалу з найбільшим к.к.д.; знайти найкращі конструктивні варіанти ланок по їх довговічності, зносостійкості і т.п.

**Викладення основного матеріалу.** При виконанні операцій легкої промисловості основною формою ударної дії робочого інструменту на матеріал (деталь) буде безпосередній удар по матеріалу (деталі) робочим інструментом і дія на матеріал (деталь) на протязі короткого часу імпульсу певної сили в результаті передачі енергії удару від ударника пресового устаткування через робочий інструмент. При ударному виконанні операцій легкої промисловості може бути два випадки.

1. Ударник із закріпленим робочим інструментом (різак, просікач, пробійник, клеймувальник, маркувальник), що розміщений на певній відстані від матеріалу (деталі) наносить по ньому удари.

2. Ударник наносить удари по робочому інструменту, що знаходиться на матеріалі (деталі).

В обох випадках енергія удару буде залежати головним чином від робочого ходу ударника і в основному від його ваги.

В роботі [2] розглядається процес передачі енергії удару при ударних видах буріння. Розроблену методику та отриманні результати даної роботи можна використати для визначення коефіцієнту передачі енергії при виконанні операцій легкої промисловості.

Потенціальна енергія піднятого над матеріалом (чи робочим інструментом) ударника буде визначатися за формулою:

$$W_n = QH = mgH \quad (1)$$

де  $Q$  - вага ударника;  $m$  - маса ударника;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $H$  - висота підйому.

При русі ударника потенціальна енергія переходить в кінетичну і витрачається на руйнування матеріалу, або розвальцювання деталі при встановленні металевої фурнітури і на переборення опору руху робочого інструменту перед ударом. Відомо, що кінетична енергія ударника перед ударом складає:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

де  $v$  - передударна швидкість.

Враховуючи опір сил при русі робочого інструменту можна записати:

$$W_n = kW_k, \quad (3)$$

де  $k$  - коефіцієнт зменшення енергії  $W_n$  внаслідок дії сил опору руху ударника.

Починаючи занурюватися в матеріал зі швидкістю  $v$ , робочий інструмент витрачає кінетичну енергію на його руйнування, при завершенні удару швидкість робочого інструменту падає до нуля. Кількість руху ударника переходить в імпульс сили, це перетворення відповідно до другого закону Ньютона записується у вигляді:

$$mv = \int_0^T F(t) dt. \quad (4)$$

Права частина рівності представляє собою імпульс дії сили  $F$ , що змінюється в часі ударника на матеріал. Час  $T$  удару залежить від властивостей матеріалу і початкових умов зіткнення, ваги і розмірів ударника, передударної швидкості, а також від профілю леза робочого інструменту.

Суть удару з точки класичної механіки заключається в зіткненні тіл, що характеризується миттєвою зміною їх швидкостей до деяких кінцевих значень. Існують інші визначення удару як явища взаємодії тіл, що протікає за дуже короткий проміжок часу, на протязі якого проходить кінцева зміна їх швидкостей або діє сила дуже великої величини. Автор роботи [5] визначає удар як явище, що виникає при зіткненні тіл і яке супроводжується повним або частковим переходом кінетичної енергії тіл в енергію деформації.

В теорії удару, заснованій на класичній механіці, розглядаються випадки абсолютно непружного, абсолютно пружного і не зовсім пружного удару. При абсолютно непружному зіткненні два тіла, що мають передударні швидкості  $v_{01}$  і  $v_{02}$ , після удару не роз'єднуються і набувають загальної швидкості  $v$ .

При абсолютно пружному ударі енергія ударної системи до і після удару залишається постійною, а відносні швидкості руху тіл залишаються попередніми. На практиці також зіштовхуються з не зовсім пружним ударом, тобто таким, при якому проходить втрата частини енергії на непружні деформації при зіткненні і, відповідно, зменшення відносної швидкості після удару.

Абсолютно непружний удар виникає при виконанні наступних операцій легкої промисловості: вирубування, перфорування та пробивання деталей; закріплення металевої фурнітури; забивання закріплювачів, тиснення візерунків.

Не зовсім пружний удар виникає при виконанні операцій легкої промисловості клеймування, маркування деталей.

При виконанні операцій легкої промисловості необхідно розглядати процес передачі енергії від одного елемента (того що вдаряє) іншому (того по кому вдаряють), який в ударній системі на початку виконання технологічної операції являється нерухомим (вирубання деталей, перфорування, закріплення металевої фурнітури). Тому необхідно більш детально зупинитися на визначенні коефіцієнта передачі енергії удару як одному з найважливіших факторів, що обумовлює ефективність ударного виконання операцій легкої промисловості, і не торкатися питання ударної взаємодії робочого інструменту з матеріалом. Взаємодію в даному випадку неможна віднести до поняття передачі енергії удару.

Коефіцієнтом передачі енергії удару в ударній системі, що складається із двох елементів, є відношення енергії переданої елементу по якому вдаряють до всієї енергії елемента, який вдаряє.

При абсолютно непружному ударі післяударні швидкості  $v_1$  і  $v_2$  однакові і рівні  $v$ . Енергія елемента, що вдаряє перед ударом визначається за формулою:

$$W_{01} = \frac{m_1 v_{01}^2}{2}, \quad (5)$$

де  $m_1$  - маса елемента, що вдаряє.

Енергія, що отримується елементом по якому вдаряють дорівнює:

$$W_2 = \frac{m_2 v^2}{2}, \quad (6)$$

де  $m_2$  - маса елемента по якому вдаряють.

Коефіцієнт передачі енергії удару складає:

$$\eta = \frac{W_2}{W_{01}}. \quad (7)$$

На основі закону збереження імпульсу при ударі можна записати:

$$m v_{01} = m_1 v_1 + m_2 v_2,$$

звідки

$$v = \frac{m_1 v_{01}}{m_1 + m_2}. \quad (8)$$

Підставляючи у формулу (7) вирази  $W_{01}$  і  $W_2$  і використовуючи залежність (8), отримаємо:

$$\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (9)$$

Замінивши  $m_1$  на  $\lambda m_2$  ( $\lambda = \frac{m_1}{m_2}$ ), знаходимо, що:

$$\eta = \frac{\lambda}{(1 + \lambda)^2} \quad (10)$$

Взявши похідну  $\frac{d\eta}{d\lambda}$  і прирівнявши її до нуля, визначимо значення  $\lambda$ , при якому коефіцієнт передачі  $\eta$  максимальний:

$$\frac{d\eta}{d\lambda} = \frac{1 - \lambda}{(1 + \lambda)^3} = 0,$$

$$\lambda = 1.$$

Таким чином, при абсолютно непружному ударі найбільший коефіцієнт передачі енергії  $\eta = \frac{1}{4}$ , що має місце при співвідношенні мас, що стикаються  $\lambda = \frac{m_1}{m_2} = 1$ .

При не зовсім пружному ударі коефіцієнт  $\eta$  є максимальним і рівним 1 при  $k = -1$  і  $\lambda = \frac{m_1}{m_2} = 1$ , тобто коли удар стає абсолютно пружним. В даному випадку формула:

$$\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 - k)^2 \quad (11)$$

перетворюється у формулу

$$\eta = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}. \quad (12)$$

При  $k = 0$  удар стає абсолютно непружним і залежність (11) перетворюється в (9).

При теоретичному і практичному використанні формул класичної механіки в розрахунках ударних систем коефіцієнт відновлення  $k$  грає ледь не основну роль. Значення його визначають експериментально, в більшості випадків  $k = -(0,5 \dots 1)$ , найбільш часто в конструкторських розрахунках приймають  $k = -0,55$ .

Вивчаючи зіткнення стержнів з різними радіусами закруглень торців, що ударяються Є.В. Александров в своїй роботі [6] показав, що для одних і тих же матеріалів значення коефіцієнта  $k$  не є постійним, як це вважалося раніше, а змінюється в залежності від форми поверхонь, що стикаються. У випадку зіткнення стержнів приблизно рівного перерізу краще співпадіння теоретичних значень з практичними спостерігається при  $\lambda = 1$ .

При виконанні операцій легкої промисловості формули теорії удару, заснованій на класичній механіці, можна використати головним чином при визначенні коефіцієнта передачі енергії удару від ударника пресового устаткування через робочий інструмент матеріалу (виробу). Більшість цих формул по конструкції аналогічні формулі (11) і можуть бути знайдені в технічній літературі. Їх відмінність може заключатися в нових коефіцієнтах, що замінюють коефіцієнт відновлення і враховують властивості самого матеріалу (виробу), форму і геометричні параметри самого робочого інструменту і т.п.

Більш точну уяву про процеси передачі енергії удару через робочий інструмент дає хвильова теорія удару. Але і класична теорія в деяких випадках може привести до достатньо точних результатів в технічних розрахунках.

В хвильовій теорії удару зіткнення тіл розглядається як виникнення коливань (хвиль деформації), що розповсюджуються від місця контакту по сферичним колам з кінцевою швидкістю. При ударному виконанні операцій легкої промисловості буде мати місце розповсюдження коливань в пружному середовищі (матеріал ударника, робочого інструменту) в результаті зіткнення ударника з робочим інструментом. Найбільш повно хвильова теорія розроблена для випадку зіткнення двох пружних стержнів, це теорія плоского поздовжнього удару [2]. Основою її послужили дослідження Б. Сен-Венана, Л.М.А. Нав'є, К.Г. Неймана, Т. Юнга, Ж.В. Бусинекса і інших. Засновником теорії плоского удару вважається Б. Сен-Венан, запропонувавший її більше 140 років тому.

Розглянемо плоский поздовжній удар з точки зору хвильової теорії стосовно операцій легкої промисловості. Припустимо, що на всю поверхню торця пружного робочого інструменту (наприклад циліндричного різачка) певної довжини раптово прикладене рівномірно розподілене навантаження  $P$  (рис.1). Під дією цього навантаження від торця стержня починає розповсюджуватися зі швидкістю  $c$  хвиля пружної деформації стискання, яка за час  $t$  пройде відстань  $ct$ . За той же час плоска поверхня торця робочого інструменту, рухаючись під впливом навантаження  $P$  зі швидкістю  $u$ , меншою чим  $c$  переміститься на відстань  $ut$ . З тією ж швидкістю  $u$  рухаються і всі перерізи, паралельні торцю на дільниці робочого інструменту, що деформується. Відносна деформація дільниці, на якій розповсюдилася хвиля стискання, визначається за формулою:

$$\varepsilon \frac{ut}{ct} = \frac{u}{c}.$$

Відомо, що  $\sigma = \varepsilon E$ , тому:

$$\sigma = \frac{u}{c} E, \quad (13)$$

де  $\sigma$  -напруження стискання, рівне  $\frac{P}{A}$  ( $A$  -площа перерізу робочого органу);  $E$  -модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга).

Прирівнюємо імпульс сили до кількості руху:

$$Pt = mu,$$

$$Pt = \rho Actu,$$

де  $\rho$  - густина матеріалу стержня.

Звідси:

$$\frac{P}{A} = \rho cu,$$

або

$$\sigma = \rho cu. \quad (14)$$

Прирівнявши праві частини рівності (13) і (14), отримаємо:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (15)$$

Таким чином швидкість розповсюдження хвилі пружної деформації залежить тільки від фізичних властивостей матеріалу робочого інструменту.

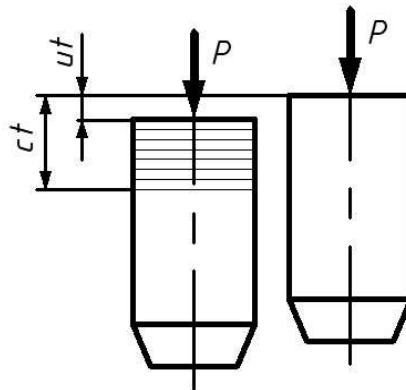


Рис. 1. Схема виникнення в робочому інструменті поздовжньої хвильової деформації стискання під дією раптово прикладеного навантаження  $P$

Теорія пружності описує стан робочого інструменту при плоскому поздовжньому ударі одним рівнянням:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 a_x}{\partial t^2}, \quad (16)$$

де  $a$  - переміщення торця робочого інструменту;  $x$  - відстань, на яку розповсюдилася хвиля деформації (вісь  $x$  співпадає з віссю робочого інструменту).

Поскільки  $\sigma_x = E \frac{da}{dx}$ , то:

$$E \frac{\partial^2 a_x}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 a_x}{\partial t^2}.$$

Враховуючи залежність (15), отримаємо:

$$\frac{\partial^2 a_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a_x}{\partial x^2} \quad (17)$$

Отримане рівняння називається хвильовим, із його аналізу випливає, що деформація при ударі розповсюджується у формі хвилі з постійною швидкістю  $c$ .

Розповсюджуючись вздовж робочого інструменту, хвиля деформації несе з собою енергію, яка складається із рівних по значенню частин кінетичної і потенціальної енергії. Рівновагою між цими частинами енергії хвилі і пояснюється постійність швидкості її переміщення.

Кінетична енергія у хвилі може бути визначена із виразу:

$$W_k = \frac{mu^2}{2}$$

де  $m$  - маса робочого інструменту на який розповсюджується зона деформації.

Але  $m = Act\rho$ , відповідно отримаємо:

$$W_k = \frac{Act\rho u^2}{2}.$$

Замінивши  $u$  на  $\sigma$  із формули (14) отримаємо:

$$W_k = \frac{A}{2\rho c} \sigma^2 t,$$

або

$$W_k = \frac{Ac}{2E} \sigma^2 t.$$

В загальному випадку, коли напруження змінюється в часі, отримаємо:

$$W_k = \frac{Ac}{2E} \int_0^T \sigma^2(t) dt,$$

а повна енергія, що переноситься хвилею деформацію буде дорівнювати:

$$W = \frac{Ac}{E} \int_0^T \sigma^2(t) dt, \quad (18)$$

Існують різні випадки передачі енергії удару пружному робочому інструменту певної довжини від ударника, площа поперечного перерізу якого може бути рівною, меншою, або більшою площі поперечного перерізу робочого інструменту.

В нашому випадку площа поперечного перерізу ударника  $A_1$  більше площі поперечного перерізу робочого інструменту  $A_2$  ( $A_1 > A_2$ ). При зіткненні робочого інструменту з ударником, у якого площа поперечного перерізу більша, чим у робочого інструменту, від контакту зіткнення по робочому інструменту починає розповсюджуватися хвиля стискання, швидкість часток в якій більше, чим у хвилі ударника (рис.2).

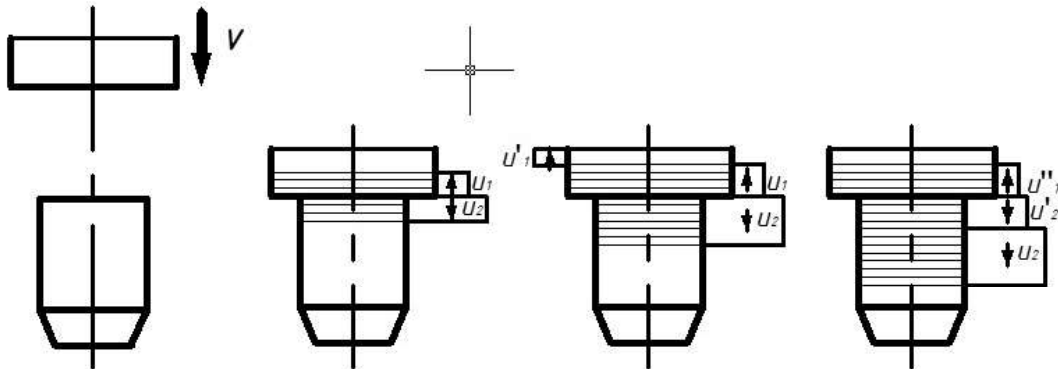


Рис.2. Схема передачі енергії удару робочому інструменту меншої чим у ударника площі поперечного перерізу

На контактні зіткнення сила, що діє на ударник, рівна силі, що діє на робочий інструмент. Тому враховуючи залежність (14), можна записати:

$$P = A_1 \rho c u_1 = A_2 \rho c u_2, \quad (19)$$

З даної формули випливає, що:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{u_1}{u_2},$$

але

$$A_1 > A_2,$$

значить

$$u_1 > u_2.$$

При ударі зі швидкістю  $v$  по робочому інструменту, як вже відмічалось, в ударнику поблизу контакту виникає пружна хвиля деформації стискання. Поверхня торця ударника і паралельні їй перерізи, що охоплені хвилею, рухаються зі швидкістю  $u_1$  по відношенню до вільного торця

ударника. З іншої сторони контакту виникає пружна деформація стискання в робочому інструменті зі швидкістю руху часток  $u_2$ . Із умови рівності просторових швидкостей контактуючих кінців ударника робочого інструменту на протязі зіткнення впливає, що:

$$v - u_1 = u_2 \quad (20)$$

Виходячи із залежності (20) можна записати, що:

$$u_2 > \frac{v}{2} > u_1. \quad (21)$$

При відбитті від вільного торця ударника швидкість часток у хвилі подвоюється і вільна поверхня ударника набуває швидкості  $v - 2u_1$ . Переміщуючись від вільного торця до контакту зіткнення, фронт хвилі розтягу послідовно розвантажує ударник від напруження стискання, причому вільні від напруження перерізи ударника набувають швидкості  $v - 2u_1$ . Дійсно, просторова швидкість перерізу в стиснутій частині рівна  $v - u_1$  (20) і направлена в сторону удару. У хвилі розтягу швидкість  $u'_1 = u_1$  і направлена в протилежну сторону. При складанні хвиль сумарна просторова швидкість перерізу ударника складе:

$$v - u_1 - u'_1 = v - 2u_1$$

При досягненні хвилею напруження контактної поверхні ударник виявляється ненавантаженим, але він має просторову швидкість:

$$v - 2u_1 \neq 0.$$

В результаті від контакту зіткнення починають розповсюджуватися нові хвилі стискання зі швидкістю відповідно  $u'_1$  і  $u'_2$ , і так продовжується до повного затухання удару. Тривалість кожної ступені у хвилі стискання робочого інструменту буде рівна  $t = \frac{2L_1}{c}$ .

Коефіцієнт передачі енергії удару в даному випадку знаходиться наступним чином [2]. Замінивши  $\sigma$  на  $\frac{P}{A}$  в формулі (14), позначимо добутки  $A_1\rho_1c_1 = z_1$  і  $A_2\rho_2c_2 = z_2$ . Тоді вираз (19) запишеться у вигляді:

$$z_1u_1 = z_2u_2 \quad (22)$$

Вирішуючи спільно рівняння (20) і (21) і вводячи позначення  $r = \frac{z_1}{z_2}$ , отримаємо:

$$u_1 = v \left[ \frac{1}{r+1} \right], \quad (23)$$

$$u_2 = v \left[ \frac{r}{r+1} \right]. \quad (24)$$

Очевидно, що в такому ж вигляді може бути записана формула для  $u'_2$ , в якій швидкість  $v$  повинна бути замінена на  $v - 2u_1$ :

$$u'_2 = (v - 2u_1) \left[ \frac{r}{r+1} \right].$$

Підставивши замість швидкості  $u_1$  її вираз (23), отримаємо:

$$u'_2 = u_2 \left[ \frac{r-1}{r+1} \right]. \quad (25)$$

Розмірковуючи аналогічним чином, знаходимо для  $n$ -ї ступені швидкість:

$$u_2^{(n)} = u_2 \left[ \frac{r-1}{r+1} \right]^n \quad (26)$$

Повна енергія у хвилі стискання, що переміщується по робочому інструменту визначається із формули [2]:



$$W = \frac{A_2 c_1 t \sum \sigma_2^2}{E_2} = \frac{2A_2 L_1}{E_2} \left[ (\sigma_2^2 + \sigma_{21}^2 + \dots + \sigma_{2(n-1)}^2) + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \sigma_{2n}^2 \right] \quad (27)$$

де  $n$  - позитивне ціле число  $\frac{L_2}{L_1} \geq n > \frac{L_2}{L_1} - 1$ ;  $L_2$  - довжина робочого інструменту;  $\sigma_2, \sigma_{21}, \dots, \sigma_{2n}$  - амплітуда напруження в кожному кроці хвилі стискання, що розповсюджується по робочому інструменту.

Використовуючи формулу (14) і підставляючи замість величини  $\sigma$  її вираз через  $u_2$  (24–26), отримаємо:

$$W = 2A_2 L_1 \rho_2 v^2 \left[ \frac{r}{4} (1 - k^n) + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \frac{r^2 k^{n+1}}{(r+1)^2} \right], \quad (28)$$

де

$$k = \frac{r-1}{r+1}$$

Кінетична енергія ударника пере зіткненням дорівнює:

$$W_y = \frac{A_1 L_1 \rho_1 v^2}{2},$$

і відповідно коефіцієнт передачі енергії буде визначатися за формулою [2]:

$$\eta = \frac{W}{W_y} = \frac{A_2}{A_1} \left[ r(1 - k^n) + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \frac{4r^2 k^{n+1}}{(r+1)^2} \right] \quad (29)$$

Якщо  $\rho_1 = \rho_2$ ,  $c_1 = c_2$ , то

$$\eta = 1 - k^n + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \frac{4rk^{n+1}}{(r+1)^2}. \quad (30)$$

Аналіз даної формули показує, що чим вищої висоти робочий інструмент, тим повніше передається на нього енергія.

**Висновки.** В статті розглянуто питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа, а саме: приведено загальну уяву про зіткнення елементів; розглянуто процес передачі енергії при виконанні технологічних операцій легкої промисловості. Визначається коефіцієнт передачі енергії удару від ударника до робочого інструменту.

#### Список використаних джерел:

1. Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – №5 – С.1 – 15.
2. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – Л: Недра, 1977. – 159 с.
3. Кармаліта А.К., Поліщук О.С. Перспективи застосування електромагнітних приводів в легкій промисловості // Вісник технологічного університету Поділля. - 1997. - №1. Ч.2. - С.131-133.
4. Поліщук О.С., Пильник Є.Р., Прибега Д.В., Кармаліта А.К. Перспективи застосування лінійних індукційно-динамічних двигунів в якості приводу пресового обладнання для виконання технологічної операції вирубування деталей взуття // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – №2 Т. 2. – С. 203 – 205.
5. Жуков И.А. Разработка научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем (на примере машин, применяемых при разрушении хрупких сред): Автореферат дис.... кандидата техн. наук: 01.02.06 / Жуков Иван Алексеевич. – Томск., 2010. – 32.
6. Александров Е.В., Соколовский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 198с.

#### Рецензенти:

**Кармаліта А.К.**, професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету, к.т.н., професор.

**Місяць В.П.**, професор кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну, д.т.н., професор

Стаття надійшла до редакції 13.06.2018