

УДК 621.73

Л.О. Рябічева, Д.А. Усатюк

Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля

## **ВПЛИВ СЛАБИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ НА ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ НА МОЛОТІ**

В роботі досліджено виникнення і розповсюдження слабких ударних хвиль при гарячій осадці та їх вплив на процес деформування металу. Одержано аналітичні залежності для визначення напружень та деформацій на хвильовій поверхні, а також енергії ударних хвиль.

В работе исследовано возникновение и распространения слабких ударных волн при горячей осадке и их влияние на процесс деформирования металла. Получены аналитические зависимости для определения напряжений и деформаций на волновой поверхности, а также энергии ударных волн.

In this paper, the initiation and propagation of weak shock waves during hot upsetting, and also their influence to deforming of a billet were investigated. The analytical dependences were obtained for determination of stress and strain onto the wave surface and for energy of shock waves.

Промисловістю серійно виготовляються штампувальні молоти з масою падаючих частин від 0,63 до 16 тон. Гаряче штампування на молотах здійснюється з високими швидкостями деформування, що складають 5-9 м/с [1]. При цьому виникає динамічне навантаження заготовки, інструмента та частин молота внаслідок розповсюдження ударних хвиль, що є результатом взаємодії інструмента з заготовкою. Донедавна хвильові процеси при ударному навантаженні заготовки детально не досліджувались внаслідок відсутності даних та методики точного визначення фізичних і механічних вла-

стивостей матеріалу у будь-якій точці заготовки при температурах гарячого деформування. Як зазначено у роботах [1, 2], ударні хвилі відіграють помітну роль у процесах деформування на молоті, є причиною струсу промислових споруд та інших негативних явищ, що супроводжують роботу молотів. Тим не менше, і в теперішній час хвильові процеси при взаємодії інструмента і заготовки досліджені недостатньо.

Метою роботи є дослідження виникнення і розповсюдження слабких ударних хвиль в системі «заготовка-інструмент», їх впливу на швидкість деформації в заготовці, а також оцінка енергетичної ефективності молотів.

Механічні властивості матеріалу заготовки моделювали, використовуючи метод термомеханічних коефіцієнтів (МТК) [3]. Параметри напружено-деформованого стану (НДС) заготовки в залежності від температурно-швидкісних умов визначали шляхом рішення нелінійної зв'язаної задачі термопластичності методом скінчених елементів (МКЕ). При побудові математичної моделі задачі термопластичності для моделювання виникнення і розповсюдження ударних хвиль усередині заготовки зроблено наступні припущення [4]: процес деформування - ізотермічний; для матеріалу інструмента застосовано пружно-пластичну модель зі швидкісним зміцненням; для матеріалу заготовки застосовано пружно-пластичну модель з температурним, швидкісним та деформаційним зміцненням; ударні хвилі - плоскі, тому що поверхня інструмента вступає в контакт одразу зі всією торцевою поверхнею заготовки; коефіцієнт тертя  $\mu = 0,2$ ; робочі органи молота моделювали як абсолютно тверді недеформовані тіла.

Дослідження виникнення і розповсюдження ударних хвиль виконано на прикладі гарячої осадки заготовок діаметром 100 мм і висотою від 30 до 200 мм. Матеріал заготовок – сталь 45Х, температура початку штампування – 1150 °С, базисне значення опору деформації  $\sigma_{од} = 89$  МПа, початкова межа міцності  $\sigma_B^{ноч} = 69$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu^{1150} = 0,32$ . Матеріал інструмента – сталь 5ХНМ, межа пропорційності  $\sigma_{02} = 1200$  МПа,  $\nu^{400} = 0,27$ , температура попереднього підігріву інструмента 400 °С. Маса падаючих частин молота  $m_M = 1, 2, 3, 15$  тон, початкова швидкість

деформування 9 м/с. Матеріал штампа працює у пружній області, тому величини деформацій не перевищують межі пропорційності [1, 3].

Для вирішення задачі термопластичності за допомогою МКЕ використано програму–вирішувач LS-DYNA 970.

На рис. 1 показано скінчено-елементну модель заготовки при ступені деформації  $\varepsilon = 2\%$  та кольорова шкала розподілу інтенсивності нормальних напружень.

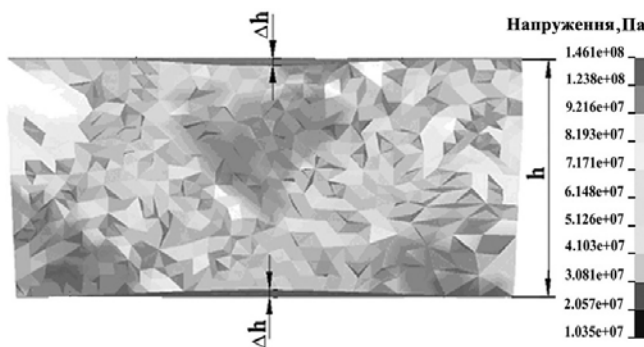


Рис. 1. Скінчено-елементна модель заготовки та шкала інтенсивностей нормальних напружень при  $\varepsilon = 2\%$

Видно, що на контактних поверхнях утворились два прогини глибиною  $\Delta h$ , причиною яких, очевидно, є виникнення ударних хвиль в системі «заготовка-штамп» [4, 5]. Необхідно оцінити природу і характер їх виникнення. Припустимо, що в момент контакту верхньої половини штампа з заготовкою, в ній і частинах штампа виникають ударні хвилі – прямі та відображені. В механіці суцільних середовищ процес розповсюдження ударних хвиль описується хвильовим рівнянням [6]:

$$\frac{\partial^2 P_W}{\partial t^2} - V_S^2 \frac{\partial^2 P_W}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

де  $P_W$  – тиск на хвильовій поверхні;  $V_S$  – швидкість звука в металі.

Рішення рівняння (1) методом характеристик дозволяє отримати вираз масової швидкості ударної хвилі  $u$  і тиску на хвильовій поверхні  $P_W$ :

$$u = \left| \pm \frac{P_W}{\rho V_S} \right| = \frac{v}{2}, \quad P_W = |\pm \rho V_S u|, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питома вага сталі;

$v$  – початкова швидкість деформування.

Формули (2) зі знаком плюс відповідають швидкості прямої хвилі, а зі знаком мінус - відображеної. Рівність обох виразів за модулем свідчить про те, що ударна хвиля розрідження дорівнює за амплітудою та протилежна за фазою хвилі стискання. Швидкість звука в металі визначається за формулою:

$$V_S = \sqrt{E/\rho}, \quad (3)$$

де  $E$  – модуль Юнга.

Оскільки процес ізотермічний, то, згідно формулі (3), швидкості звука в заготовці та штампі залишаються незмінними і складають 3650 м/с та 4900 м/с. Слід зазначити, що величина тиску  $P_W$  залежить від виду оброблюваного матеріалу, температури початку штампування, початкової швидкості деформування і не залежить від розмірів заготовки. Розрахунки за формулами (2) показали, що тиск в заготовці на хвильовій поверхні  $P_W = 143$  МПа, а в штампі  $P_W = 192$  МПа. Згідно результатів розрахунків за методикою, яку викладено в роботі [7], при швидкості звука в заготовці  $V_S = 3650$  м/с,  $\sigma_T = 150$  МПа, а  $\sigma_B = 186$  МПа. Отже при малих ступенях деформації  $\varepsilon \leq 2\%$  ударні хвилі в заготовці викликають лише пружні деформації. В момент проходження фронту хвилі метал на хвильовій поверхні переходить у пружний стан внаслідок швидкісного зміцнення. При цьому тиск на хвильовій поверхні залишається менше межі міцності. Процес розповсюдження ударних

хвиль схематично показано на рис. 2 а. Залежність частоти коливань  $f$  від висоти заготовки, причому висота заготовки дорівнює довжині хвилі  $\lambda$ , що визначена згідно формули  $f = V_s / \lambda$  [6]. При висоті заготовки менше 150 мм частоти ударних хвиль знаходяться в області ультразвуку (рис. 2 б), тобто чутні звуки в таких випадках випромінює тільки інструмент та частини молота. Зі збільшенням висоти заготовки частота коливань зменшується.

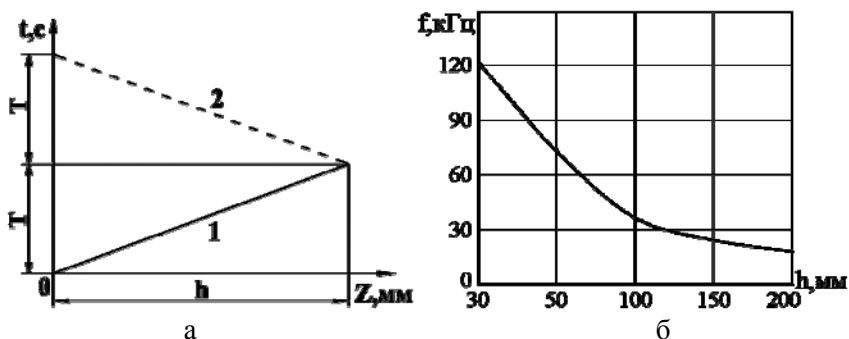


Рис. 2. Схема розповсюдження ударних хвиль (а) та залежність частоти коливань від висоти заготовки (б):

1 – пряма хвиля; 2 – відображена хвиля

Внаслідок дії сил інерції, швидкості коливального руху частинок металу не досягають швидкості звука в момент проходження фронту хвилі, а коливання не припиняються негайно після його проходження. При зустрічі фронтів хвиль стискання і розрідження тиск і швидкість деформації навколо середини заготовки дорівнюють нулю. Максимум та мінімум швидкості деформації безперервно переміщуються по висоті заготовки зі швидкістю звука (рис. 3 а), при проходженні хвилі стискання в моменти часу  $5,0 \cdot 10^{-5}$  с (крива 1),  $5,33 \cdot 10^{-5}$  с (крива 2) та  $5,66 \cdot 10^{-5}$  с (крива 3),  $\varepsilon = 2$  %. При цьому швидкості деформації змінюються від  $80 \text{ с}^{-1}$ , при відсутності фронту хвилі, до  $325 \text{ с}^{-1}$  на хвильовій поверхні. В момент зустрічі хвиль стискання і розрідження посередині заготовки, хвиля стискання збільшує швидкості деформації, а хвиля розрідження зменшує їх (рис. 3 б). Внаслідок цього в момент зустрічі

цих хвиль переміщення часток металу припиняється, а швидкість деформації в середині заготовки обертається на нуль у відповідності до результатів інтегрування хвильового рівняння (1).

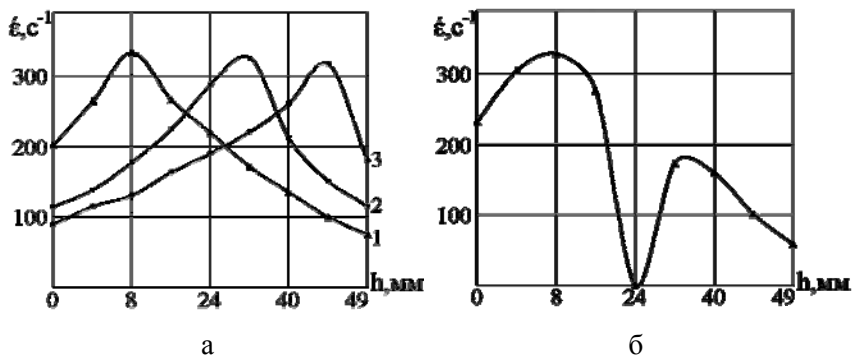


Рис. 3. Розподіл інтенсивності швидкості деформації по вертикальній вісі заготовки (а) та в момент зустрічі хвиль (б)

Формула, що визначає інтенсивність нормальних напружень  $\sigma_{ws}$  на хвильовій поверхні, згідно до закону Гука має вигляд [6]:

$$\sigma_{ws} = E \frac{\Delta h}{h} = \frac{F_n}{S}, \quad (4)$$

де  $F_n$  – сила нормального тиску на торець заготовки;

$S$  – площа торця заготовки.

Відомо [6], що гармонічні коливання матеріальної точки подібні до проекції обертального руху по окружності на площину, перпендикулярну площині обертання. При цьому кутова швидкість точки повинна дорівнювати циклічній частоті коливань. Принцип суперпозиції хвиль дозволяє будь-яку не синусоїдальну хвилю замінити групою синусоїдальних и застосувати закони гармонічних коливань при дослідженні не гармонічних. В такому випадку, після перетворень отримуємо формулу інтенсивності напружень на хвильовій поверхні:

$$\sigma_{ws} = \frac{Qf^2 h^2}{\rho}, \quad (5)$$

де  $Q$  – енергія удару молота.

Розрахунки по формулі (5) показали, що в досліджуваній заготовці інтенсивність напружень  $\sigma_{ws} = 138$  МПа, тобто приблизно дорівнює тиску хвилі  $P_w$ . Це означає, що розповсюдження плоскої ударної хвилі супроводжується виникненням нормальних напружень, величина яких знаходиться у відповідності до тиску на хвильовій поверхні. Звідси слідує, що хвилі, які виникають в інструменті при взаємодії з заготовкою, є чисто пружними хвилями і слугують основною причиною шуму та інших негативних явищ при роботі молотів. На технологічний процес вони становлять незначний вплив, тому в подальшому розглянуті тільки хвилі всередині заготовки.

Після підстановки виразу (5) у (4) отримуємо формулу для визначення величини прогину  $\Delta h$ :

$$\Delta h = \frac{Qf^2 r^2 h}{\rho E}. \quad (6)$$

Порівняння результатів розрахунків за МКЕ та формулою (6) підтвердили, що амплітуда коливань ударної хвилі дорівнює величині прогину на торцевій поверхні. При осадці на молоті величина прогину зі збільшенням енергії удару зростає, а зі збільшенням відношення  $h/d$  зменшується (рис. 4). При висоті заготовки більше діаметра величина прогину прагне до нуля.

Оскільки модулі Юнга матеріалів заготовки при  $1150$  °С і інструмента при  $400$  °С відрізняються в 1,9 рази, то поверхні контакту є також і межами розділу середовищ. Згідно принципу Гюйгенса-Френеля, поведінка хвилі залежить від співвідношення між висотою заготовки  $h$  (довжиною хвилі) та діаметром торця  $d$  (розмір перешкоди).

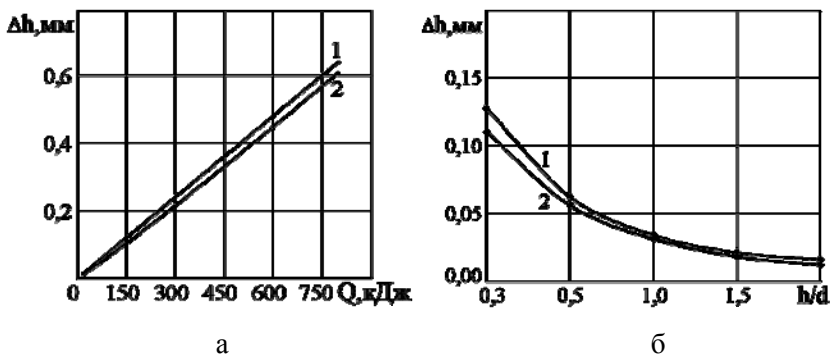


Рис. 4. Залежність величини прогину від енергії удару (а) та відношення  $h/d$  (б): 1– за МКЕ; 2– з хвильового рівняння

Якщо  $h/d \leq 1$ , то відбувається дзеркальне відображення хвилі стискання хвилею розрідження. Якщо  $h/d > 1$ , то в процесі збільшення цього співвідношення все більша частка енергії ударних хвиль буде проникати в нижню частину штампа і далі до шаблону в процесі заломлення ударних хвиль [6]. Коли ступінь деформації  $\varepsilon > 2\%$ , починається швидке затухання ударних хвиль внаслідок короткочасного відриву контактних поверхонь заготовки від поверхонь інструменту [5, 6]. Після зникнення прогинів контактних поверхонь інструмента і заготовки відновлюється, причому верхня частина штампа продовжує служити джерелом ударних хвиль, довжина яких зменшується при збільшенні ступеню деформації внаслідок скорочення відстані між торцями заготовки.

З хвильового рівняння (1) слідує, що кінетична енергія плоскої хвилі дорівнює потенціальній, тому об'ємну питому вагу енергії ударної хвилі  $\varpi$  в заготовці можна визначити виходячи з величини викликаной нею відносної деформації по формулі [6]:

$$\varpi = \rho V_s^2 \varepsilon_w^2, \quad (7)$$

де  $\varepsilon_w$  - додатковий ступінь деформації, що викликана хвилею.

Виходячи з умови постійності об'єму і знаючи об'єм заготовки  $V$ , можна визначити енергію ударної хвилі  $W$ , сумарне число



коливань  $n$  підчас технологічної операції та сумарну енергію хвиль  $W_{\Sigma}$  [6]:

$$W = \varpi V, n = \frac{fsh}{v}, W_{\Sigma} = Wn. \quad (8)$$

В табл. 1 наведені результати розрахунку енергії ударних хвиль для поковок діаметром 100 мм і висотою 30-200 мм.

Таблиця 1

Результати розрахунку енергії ударних хвиль

Висота заготовки, мм	Об'ємна питома вага енергії, $\frac{кг}{м \cdot с^2}$	Енергія хвиль, Дж	Сумарне число коливань	Сумарна енергія хвиль, Дж	$\frac{W}{Q}$ , %
30	346000	81,5	200	16300	40,3
50	205000	80,5	200	16100	20
100	12090	9,5	200	1900	2,4
150	5195	6,1	200	1220	1
200	1812	2,9	200	580	0,5

З табл. 1 слідує, що енергія ударних хвиль не перевищує 81,5 Дж, тобто розглянуті ударні хвилі є слабими. Зменшення висоти заготовки призводить до зростання об'ємної питомої ваги енергії ударних хвиль.

Таким чином, моделювання гарячої осадки на штампувальних молотах з використанням МКЕ та розрахунки з використанням хвильового рівняння підтверджують факт існування на поверхнях контакту заготовки прогинів при малих ступенях деформації. Причиною їх виникнення є слабкі ударні хвилі. Величина прогинів залежить від енергії удару, площі поверхонь контакту, але не зале-

жить від матеріалів заготовки і штампку. Поле швидкостей деформації в заготовці при цьому вельми неоднорідне, тому що мінімум і максимум швидкості деформації безперервно переміщуються разом з ударними хвилями. Якщо висота заготовки менше її діаметру, то сумарна енергія хвиль порівнювана з енергією удару молота, що необхідно враховувати при порівнянні енергетичної ефективності молотів та іншого ковальсько-пресового обладнання.

#### Література

1. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
2. Радзивончик В.Ф. Скоростное пластическое деформирование металлов. Харьков, 1967. – 211 с.
3. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
4. Wagoner R.H., Chenot J.-L. Metal Forming Analysis. Cambridge University Press, 2001. – 376 с.
5. Ноткина Е.А., Чижов А. В., Шмидт А.А. Моделирование разрушения упруго-пластических материалов, допускающих фазовый переход. Письма в ЖТФ. Том 24. № 18, 1998. – с. 91–95.
6. Зельдович Я.Б., Райзор Ю.П., Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 406 с.
7. Рябичева Л.А., Усатюк Д.А. Применение метода термомеханических коэффициентов к анализу напряженно-деформированного состояния при горячей осадке // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2006. № 6(100). Ч.1. с. 45-49.