

Подано аналіз роботи зубчастих передач, що використовуються у прокатному обладнанні, вказано закон зміни перемінного навантаження, дана оцінка ресурсу роботи відповідно до принципу лінійного підсумовування ушкоджень.

**Ключові слова:** зубчаста передача, умови та ресурс роботи, втомна міцність, закон розподілення.

The analysis of work of gearings which are utilized in a rental equipment is given, the law of change of the variable loading is indicated, the estimation of resource of work in accordance with principle of the linear adding up of damages is given.

**Keywords:** gearing, terms and resource of work, tireless durability, distributing law.

УДК 621.77

**В. О. ЄВСТРАТОВ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

**В. М. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;

**В. С. КАЛИТА**, магістрант, НТУ «ХПІ».

## **ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИДАВЛЮВАННЯ В УМОВАХ НЕСИМЕТРИЧНОГО РОЗТАШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТА**

У статті представлені результати теоретичного дослідження процесу холодного видавлювання деталей типу коробок зі змінною за периметром товщиною стінки, які отримані з використанням енергетичного методу. Значення параметрів, які варіювали, визначали із принципу мінімуму повної енергії деформації. На основі отриманих закономірностей розроблений і реалізований алгоритм математичної моделі. Результати дослідження можуть бути корисні при розробленні нових і вдосконалюванні існуючих технологічних процесів.

**Ключові слова:** видавлювання, деформація, коробка із змінною за периметром товщиною стінки, САПР, моделювання.

**Вступ.** Скорочення витрати металу, збільшення продуктивності праці й підвищення якості деталей машин і приладів можливе на основі прискореного розвитку та застосування в промисловості прогресивних технологічних процесів. Одним з таких процесів є холодне видавлювання, яке широко застосовується в економічно розвинених країнах світу.

Холодне видавлювання характеризується схемою напруженого стану з високим значенням гідростатичного тиску, що дозволяє здійснювати формозміну заготовки зі значними ступенями деформації без її руйнування. Крім того, у результаті значного зміцнення межа міцності зростає в 1,5...2 рази, а в результаті поліпшення структури підвищується зносостійкість і втомна міцність деталей. Це дає можливість використовувати більш дешеві сплави й заощадити на термообробленні. У порівнянні з литтям і гарячим штампуванням КВМ при холодному видавлюванні вище на 10...30%, а в порівнянні з різанням – у 2...3 рази. Крім того, одержувані вироби вимагають мінімальних обсягів оздоблювальних операцій і механічного оброблення.

**Аналіз останніх досліджень і літератури.** У різних галузях промисловості (машинобудуванні, приладобудуванні, електронній, радіотехнічній) широко використовують порожнисті вироби прямокутної

форми типу коробок з постійною і змінною по периметру товщиною стінки (рис. 1).



Рис. 1 – Деталь типу коробок

Незважаючи на очевидну доцільність виготовлення таких деталей видавлюванням, технології ХВ використовують усе ще недостатньо широко. Це пов'язане з тим, що технологічні розрахунки для процесів видавлювання деталей прямокутної форми базуються багато в чому на емпіричних даних, а існуючі теоретичні розв'язки внаслідок ряду допущень досить неточні, що не дозволяє автоматизувати процес технологічної підготовки з використанням ЕОМ. Так, наприклад, в існуючих розв'язках деформаційне зміцнення, вплив якого при холодному видавлюванні досить велике, взагалі не враховується, а межа плину вважається постійною величиною [1, 2]. Очевидно, що такий спрощений підхід був обумовлений обмеженістю та низькою швидкістю обчислювальних засобів, що не дозволяли за прийнятний час вирішувати такі не прості, у тому числі і у математичній постановці, завдання. Зараз, завдяки успіхам у розвитку обчислювальної техніки, з'явилася можливість вирішувати дуже складні завдання, наприклад, плину металу при зворотному вдавлюванні в умовах несиметричного розташування матриці відносно пуансона [3, 4].

**Мета досліджень, постановка проблеми.** При видавлюванні деталей зі змінної по периметру товщині стінки пуансон розташовується несиметрично щодо площини симетрії матриці. Пуансон так само може розташовуватися несиметрично при видавлюванні деталей з постійною товщиною стінки в результаті похибок виготовлення інструмента або налагодження штампа. В цьому випадку у відповідності із законом найменшого опору має місце нерівномірність деформації, зміщення поверхні розділу плину металу щодо площини симетрії матриці, а через це до отримання різної висоти стінок. Щоб запобігти цьому, необхідно навчитися керувати процесом, наприклад шляхом збільшення опору плину металу в більш товсту стінку. Але такі завдання можна вирішувати, тільки в тому випадку, коли є відповідна математична модель процесу.

Метою даного дослідження було одержання теоретичних залежностей і створення математичної моделі процесу холодного видавлювання деталей типу коробок зі змінною по периметру товщиною стінки, що дозволяють із урахуванням деформаційного зміцнення визначити енергосилові параметри,

вирішувати завдання кінцевої формозміни і розробляти відповідні системи САПР ХВ.

**Матеріали досліджень.** Розрахункова схема видавлювання представлена на рис. 2. Осередок деформації включає зони 1, 1t, 2 і 2t. Для центральної області коробки можна вважати, що деформація плоска, а швидкість плинину металу в напрямку, що перпендикулярний площині перетину, дорівнює нулю. Розмір  $\Delta$  визначає положення поверхні розділу плинину. Цей параметр поряд з висотою осередку деформації в зонах 1 і 1t може бути визначений тільки на основі варіаційного підходу з використанням принципу мінімуму повної енергії деформації [5].

Для побудови математичної моделі процесу видавлювання в умовах плоскої деформації з несиметричним розташуванням пуансона щодо матриці використовували енергетичний метод [5, 6].

Відповідно до алгоритму даного методу побудоване поле швидкостей для зон 1, 1t, 2, 2t, 3 і 3t (рис. 3), отримані аналітичні залежності для компонентів вектора швидкості по відповідним координатам, розраховані компоненти тензора швидкостей деформації та інтенсивність швидкостей деформації для кожної із зон, що утворюють осередок деформації.

Загальне зусилля деформування  $F_\delta$  визначали як

$$F_\delta = \frac{1}{v_0} \cdot \sum_{j=1}^{18} N_j, \quad (1)$$

де  $v_0$  – швидкість інструмента;

$N_j$  – потужності внутрішніх сил опору деформації, потужності тертя й потужності зсуву ( $j = 2 \dots 19$ ):

1) потужності внутрішніх сил спротиву деформації (індекси показують зону, де розраховуємо відповідну потужність):

$$N_{\text{всц}\delta 1} = \int_{h-h_\delta}^h \int_0^L \int_0^{b_n+\delta} \sigma_s(\varepsilon_{i1}) \cdot \xi_{i1} \cdot dx dy dz, \quad (2)$$

$$N_{\text{всц}\delta 1t} = \int_{h-h_\delta}^h \int_0^L \int_{-(b_n-\delta)}^{\Delta} \sigma_s(\varepsilon_{i2t}) \cdot \xi_{i2t} \cdot dx dy dz, \quad (3)$$

$$N_{\text{всц}\delta 2} = \int_{h-h_\delta}^h \int_0^L \int_{b_n+\delta}^B \sigma_s(\varepsilon_{i2}) \cdot \xi_{i2} \cdot dx dy dz, \quad (4)$$

$$N_{\text{всц}\delta 2t} = \int_{h-h_\delta}^h \int_0^L \int_{-B}^{-(b_n-\delta)} \sigma_s(\varepsilon_{i2t}) \cdot \xi_{i2t} \cdot dx dy dz; \quad (5)$$

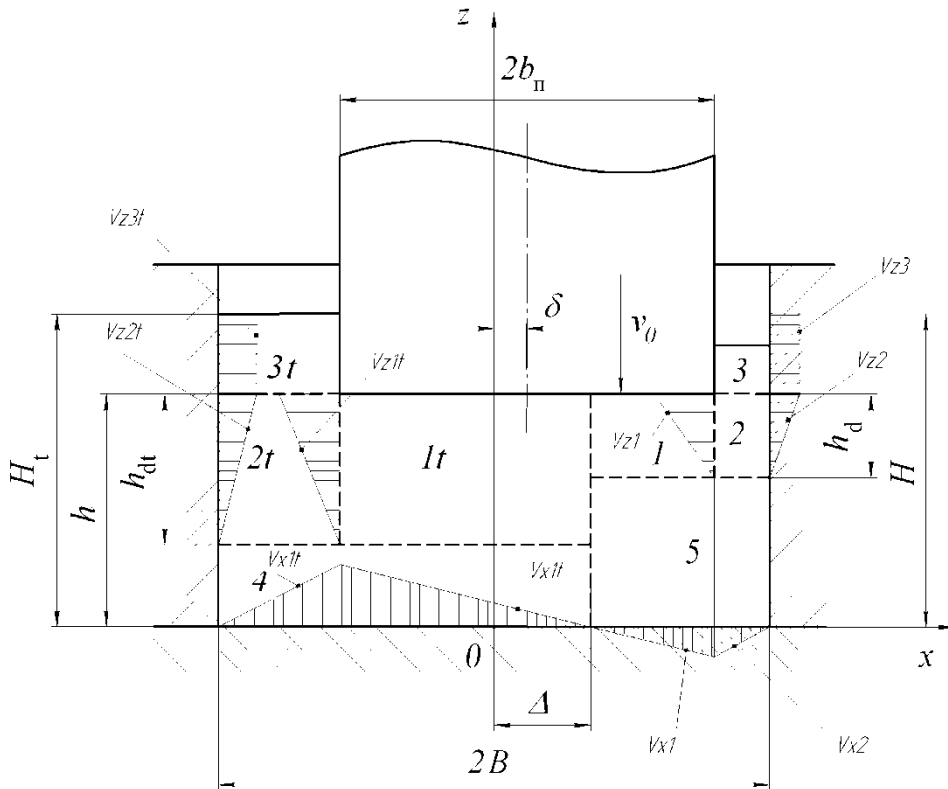


Рис. 2 – Розрахункова схема та поле швидкостей процесу видавлювання коробки із змінною по периметру товщиною стінки

2) потужності тертя:

$$N_{mp1} = \int_0^{L} \int_{\Delta}^{b_n + \delta} \tau_{\kappa} \cdot |v_{x1}(x)| \cdot dx dy, \quad (6)$$

$$N_{mp1t} = \int_0^L \int_{0-(b_n - \delta)}^{\Delta} \tau_{\kappa} \cdot |v_{x1t}(x)| \cdot dx dy, \quad (7)$$

$$N_{mp2} = \int_{h-h_0}^h \int_0^L \tau_{\kappa} \cdot |v_{z2}(z)| \cdot dy dz, \quad (8)$$

$$N_{mp2t} = \int_{h-h_{0t}}^h \int_0^L \tau_{\kappa} \cdot |v_{z2t}(z)| \cdot dy dz, \quad (9)$$

$$N_{mp3} = 2 \cdot \int_h^H \int_0^L \tau_{\kappa} \cdot |v_{z3}| \cdot dy dz, \quad (10)$$

$$N_{mp3t} = 2 \cdot \int_h^{H_t} \int_0^L \tau_{\kappa} \cdot |v_{z3t}| \cdot dy dz; \quad (11)$$

3) потужності зсуву:

$$N_{c1-t} = \int_0^L \int_{h-h_0}^h \tau_s \cdot |v_{z1}(z) - v_{z1t}(z)| \cdot dz dy, \quad (12)$$

$$N_{c1t-5} = \int_0^L \int_{h-h_0}^{h-h_0} \tau_s \cdot |v_{z1t}(z)| \cdot dz dy, \quad (13)$$

$$N_{c1-5} = \int_0^L \int_{\Delta}^{b_n+\delta} \tau_s \cdot |v_{x1}(x)| \cdot dx dy, \quad (14)$$

$$N_{c1-2} = \int_0^L \int_{h-h_0}^h \tau_s \cdot |v_{z1}(z) - v_{z2}(z)| \cdot dz dy, \quad (15)$$

$$N_{c2-3} = N_{c2-5} = \int_0^L \int_{b_n+\delta}^B \tau_s \cdot |v_{x2}(x)| \cdot dx dy, \quad (16)$$

$$N_{c1t-4} = \int_0^L \int_{-(b_n-\delta)}^{\Delta} \tau_s \cdot |v_{x1t}(x)| \cdot dx dy, \quad (17)$$

$$N_{c1t-2t} = \int_0^L \int_{h-h_0}^h \tau_s \cdot |v_{z1t}(z) - v_{z2t}(z)| \cdot dz dy, \quad (18)$$

$$N_{c2t-3t} = N_{c2t-4} = \int_0^L \int_{-B}^{-(b_n-\delta)} \tau_s \cdot |v_{x2t}(x)| \cdot dx dy, \quad (19)$$

де  $v_{zk}$  та  $v_{xk}$  – компоненти векторів швидкості ( $k$  – індекс позначення зони);

$\xi_{ik}$  – інтенсивність швидкостей деформації;

$\sigma_s(\varepsilon_{ik}) = f(\varepsilon_{ik})$  – межа плину (функція інтенсивності деформації  $\varepsilon_{ik}$ ),

$\tau_k = \mu \cdot \sigma_s(\varepsilon_{ik})$  – контактне дотичне напруження (по формулі Зібеля),

$\mu$  – коефіцієнт тертя;

$\tau_k = 0,5 \cdot \sigma_s(\varepsilon_{ik})$  – межа плину на зсув;

$L$  – довжина деталі, що видавлюється. Інші величини у формулах (2...19) показані на схемі процесу (див. рис. 2).

Межу плину як функцію інтенсивності деформації розраховували для кожної зони, використовуючи апроксимацію діаграми дійсних напружень кубічною залежністю [7]:

$$\sigma_s(\varepsilon_i) = A_3 \cdot \varepsilon_i^3 + A_2 \cdot \varepsilon_i^2 + A_1 \cdot \varepsilon_i + A_0, \quad (20)$$

де  $A_0, A_1, A_2$  і  $A_3$  – коефіцієнти, що залежать від матеріалу.

При створенні математичної моделі процесу від зусилля деформування переходили до його питомої величини:

$$\bar{p}(\Delta, h_0, h_{0m}) = \frac{F_0(\Delta, h_0, h_{0m})}{\sigma_{s0} \cdot 2 \cdot b_n \cdot L}, \quad (21)$$

де  $\sigma_{s0}$  – межа плину для незміцненого матеріалу.

Усі рівняння приводили до критеріального виду.

Мінімізація питомого зусилля деформування як функції параметрів, що варіювалися  $(\Delta, h_0, h_{0m})$ , проводили методом покоординатного спуску.

Інтенсивності деформації для кожної із зон осередку деформації знаходили шляхом інтегрування відповідних залежностей для інтенсивностей швидкостей деформації за часом:

$$\varepsilon_i = \int_{\Delta\tau} \xi_i d\tau. \quad (22)$$

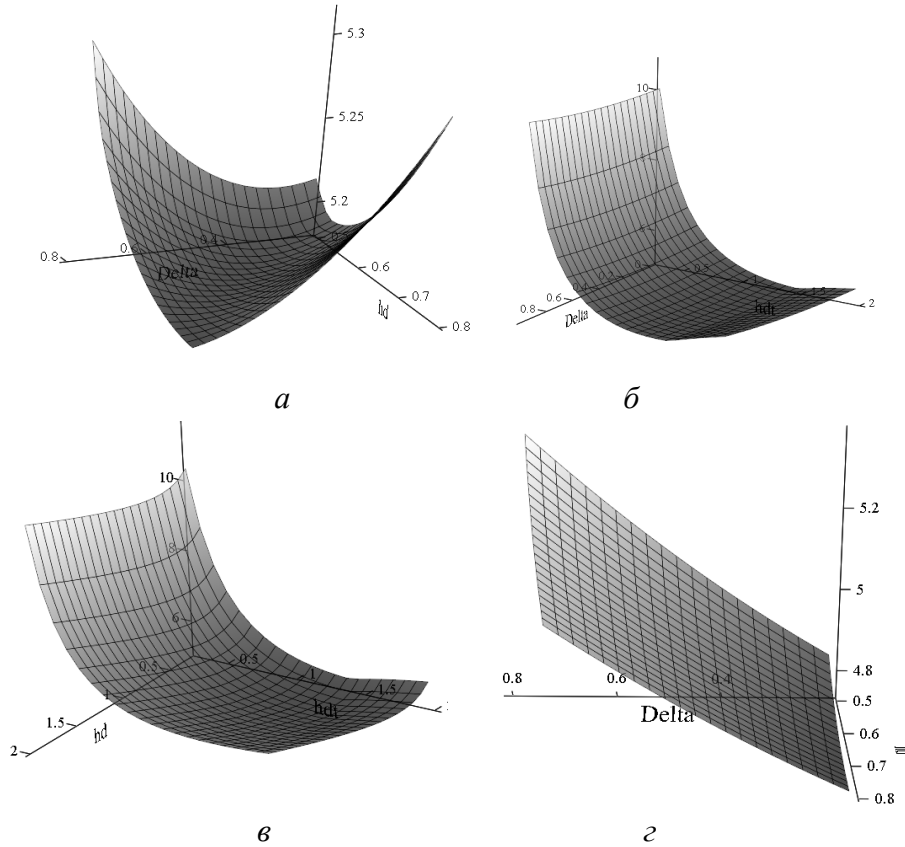


Рис. 3 – Графіки залежностей питомого зусилля деформації: *a, б, в* – для  $\bar{\delta} = 0,15$  як функції параметрів  $\bar{\Delta}$  і  $\bar{h}_0$  при  $\bar{h}_{0t} = 1,52$ ,  $\bar{\Delta}$  і  $\bar{h}_{0t}$  при  $\bar{h}_0 = 0,57$ ,  $\bar{h}_0$  і  $\bar{h}_{0t}$  при  $\bar{\Delta} = 0,208$ ; *г* – при  $\bar{\delta} = 0$  як функція параметрів  $\bar{\Delta}$  і  $\bar{h}_0$  при  $\bar{h}_{0t} = 0,73$

**Результати досліджень.** Математична модель процесу реалізована в програмному середовищі Lazarus. Графіки залежностей питомого зусилля деформації від величини параметрів  $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{b_n}$ ,  $\bar{h}_t = \frac{h_t}{b_n}$ , і  $\bar{h}_{0t} = \frac{h_{0t}}{b_n}$  представлені на рис. 4 (для  $\mu = 0,1$ ;  $\bar{b}_n = 1$ ;  $\bar{B} = \frac{B}{b_n} = 1,3$ ;  $\bar{h} = \frac{h}{b_n} = 2$ ;  $\bar{H} = \frac{H}{b_n} = 2,2$ ;  $\bar{H}_t = \frac{H_t}{b_n} = 2,3$ ). З рис. 4, *a, б* и *в* видно, що при  $\bar{\delta} = 0,15$  для кожної пари параметрів, що варіюються, є зона, де розташований мінімум функції (величина третього параметра на всіх трьох графіках відповідала цій точці). При  $\bar{\delta} = 0$  (відсутність зсуву пуансона щодо матриці), параметр  $\bar{\Delta} = 0$  (див. рис. 4, *г*), що відповідає видавлюванню деталі з однакою товщиною стінок при однаковій швидкості плинину металу між пуансоном і матрицею, а отже, однаковій висоті лівої та правої стінок деталі.

**Висновки.** У результаті проведеного теоретичного аналізу процесу видавлювання деталі типу коробок при несиметричному розташуванні інструмента розроблена математична модель, що дозволяє розрахувати величини параметрів, що визначають розміри осередку деформації та кінематику руху часток деформованої заготовки та енергосилові параметри процесу з урахуванням деформаційного зміцнення. Створений алгоритм і машинна модель (програма). Результати дослідження можна використати при розробленні підсистеми САПР ХВ порожнистих деталей прямокутної форми із змінною за периметром товщиною стінки.

**Список літератури:** 1. *Евстратов В.А., Куликов И.В., Иванов О.М.* Влияние несоосности инструмента на характер деформации и силовой режим и нагрузки, действующие на пуансон при выдавливании / *В.А. Евстратов, И.В. Куликов, О.М. Иванов* // Вестник Харьковского политехнического института. Прогрессивная технология обработки металлов, 1977. – № 131. – Вып. 4. – С. 38-44. 2. *Куликов И.В.* О влиянии противодействия на формоизменение и силовой режим при плоском несимметричном выдавливании. – Вестн. Харьк. политехн. ин-та «Прогрессивная технология обработки металлов», 1977, № 131, вып. 4, С. 45-48. 3. *Евстратов В.А.* Математическое моделирование процессов выдавливания в условиях трехмерного течения / *В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко, В.Н. Левченко* // Обработка материалов давлением: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2010. – №2 (23). – С. 8-15. 4. *Евстратов В.А.* Применение математических моделей для анализа и совершенствования процессов штамповки в условиях неосесимметричного течения / *В.А. Евстратов, В.Н. Левченко, Г.А. Кротенко* // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 4-й Междунар. н.-техн. конф. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2001. – С. 210-211. 5. *Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А.* и др. Теория обработки металлов давлением. (Вариационные методы расчета усилий и деформации). Под ред. *И.Я. Тарновского*. М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с. 6. *Евстратов В.А.* Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Вища шк., 1981. – 248 с. 7. *Евстратов В.О., Левченко В.М.* Теорія пластичної деформації. Збірник задач і вправ. – Харків: ДП УкрНДІМет-СЕРТ, 2007. – 157 с.

*Надійшла до редколегії 29.10.2013*

УДК 621.77

**Теоретичний аналіз процесу видавлювання в умовах несиметричного розташування інструмента / Євстратов В. О., Левченко В. М., Калита В. С.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 48-54. Бібліогр.: 7 назв.

В статті представлені результати теоретичного дослідження процесу холодного об'ємного видавлювання деталей типу коробок з перемінною товщиною стінки, отримані з використанням енергетичного методу. Значення варіюємих параметрів визначали з принципу мінімуму повної енергії деформації. На основі отриманих закономірностей розроблено і реалізовано алгоритм математичної моделі. Результати дослідження можуть бути корисні при розробці нових і вдосконаленні існуючих технологічних процесів.

**Ключевые слова:** выдавливание, деформация, коробка с переменной по периметру толщиной стенки, САПР, моделирование.

The article presents the results of theoretical studying of the process of cold extrusion of the boxes with variable wall thickness with using the power method. The values of the variable parameters were determined from the principle of minimum total strain energy. On the basis of the dependents the algorithm of the mathematical model was developed and implemented. The results of studying may be useful in developing new and improving existing processes.

**Keywords:** extrusion, deformation, box with variable wall thickness, CAD, modeling.