

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ  
ТИПУ «ГАЙКА» З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ**

*В роботі розглянуті теоретичні основи процесу видавлювання деталей. Представлена математична модель течії металу, на основі якої обраховане відносне зусилля деформації в умовах тривимірної течії металу. На основі експериментальних розрахунків сформульовані практичні рекомендації для збільшення стійкості технологічного оснащення і зменшення виробничого браку.*

*Ключові слова: течія металу, деформації, видавлювання, матриця, пуансон.*

Y.V. SAVITSKY, O.V. YAREMCHUK  
Khmelnitsky National University

**IMPROVING THE PROCESS OF COLD PRESSING OF PARTS  
SUCH AS "NUTS" TO IMPROVE THE QUALITY ARTICLES**

*In this work the theoretical foundations of the process of extrusion parts. The process of radial extrusion with three-dimensional metal flow. A mathematical model of the flow of metal. On the basis of which calculated the relative deformation la efforts in terms of three-dimensional metal flow. Based on experimental calculations formulated practical recommendations to improve stability and reduce tooling manufacturing defects.*

*Keywords: current metal deformation, extrusion, matrix, punch.*

**Постановка проблеми.** Холодне об'ємне штампування є вискоелективним процесом виготовлення деталей і широко використовується в світовому машинобудуванні. Особливе місце серед операцій об'ємного штампування займає видавлювання. В умовах вільної економічної зони з ЄС основні критерії конкурентоздатності продукції – її ціна та якість, яка досягається впровадженням нових і вдосконаленням існуючих технологій.

**Аналіз останніх досліджень.** Однією із високопродуктивних і економічних процесів виготовлення деталей є холодне видавлювання (ХВ) зі сплавів кольорових металів і різних марок сталей [1]. Економічна доцільність застосування холодного видавлювання визначається підвищенням якості деталей, скороченням витрат металу, зменшенням трудомісткості, зниженням собівартості. Найвища ефективність процесів холодного видавлювання досягається при виробництві вісесиметричних деталей і складної форми з великими перепадами перетинів порожнинами різної конфігурації [2].

**Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми.** На рис. 1 зображено креслення видавленої заготовки гайки М42х2. Дана гайка використовується для комплектації рукава високого тиску (Ду=25-4SH, Р=320 Bar.), який забезпечує роботу силової гідравлічної системи зернозбиральних комбайнів виробництва ОАО «Гомсельмаш» Білорусь.

Проте під час виготовлення цієї деталі виникають деякі проблеми, а саме:

- з'являються поверхневі дефекти (тріщини, утяжини, зариви, задири та інші дефекти) (рис. 2);

- низька стійкість кошового штампового інструменту (матриць і пуансонів), що зменшує продуктивність роботи і збільшує її собівартість.

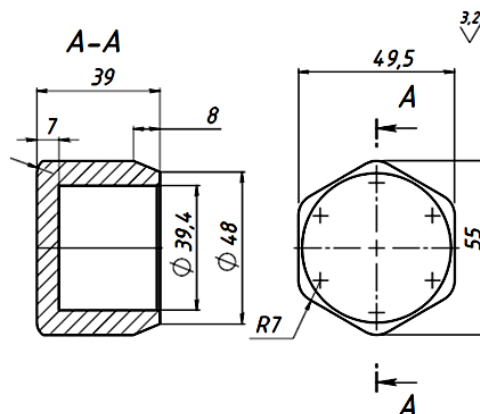


Рис. 1. Заготовка гайки S50(M42x2)



Рис. 2. Поверхневі недоліки заготовки гайки отриманої холодним видавлюванням:  
а – зариви, утяжини; б – тріщини, шорсткість, в – поздовжні тріщини

**Виклад основного матеріалу.** Вибір того чи іншого способу при виробництві виробів

видавлюванням вимагає розробки науково обґрунтованої технології [3], що дозволяє прогнозувати механічні характеристики одержуваних деталей на стадії проектування технологічного процесу. Крім того, розробка раціональних технологічних процесів сприяє вирішенню завдань по розширенню можливостей холодного видавлювання за рахунок зниження питомої сили, яка сприймається пуансонами, знаходження оптимальної форми пуансона, апробація різних марок сталей з метою їх підбору по найоптимальнішим експлуатаційним властивостям.

Теоретично доведено [4], що процеси видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки характеризуються специфічною тривимірною течією металу. Ця течія не є вісесиметричною, що до цього часу не враховувалось в теоретичних рішеннях. Доведено, що видавлювання проходить у дві стадії: перша, що відбувається як радіальна течія металу, на якій здійснюється формування фестону по верхньому торцю деталі (рис. 3); друга – як тривимірна (вихрова), тобто всі три компоненти швидкості відмінні від нуля:  $v_r \neq 0$ ;  $v_\theta \neq 0$ ;  $v_z \neq 0$  (рис. 4). За вихідні параметри взято розміри пуансона  $r_n$ , матриці  $A$ , заготовки  $h_3$ . Для першого етапу деформації припускаємо, що в зонах 1, 2 має місце радіальна течія, зона 3 може бути пластичною (за рахунок зсувів), а в зоні 4 деформація відсутня, тому вона – жорстка зона. Поля швидкостей в зонах 1, 2, 3 в циліндричній системі координат мають наступний вигляд (рис. 3):

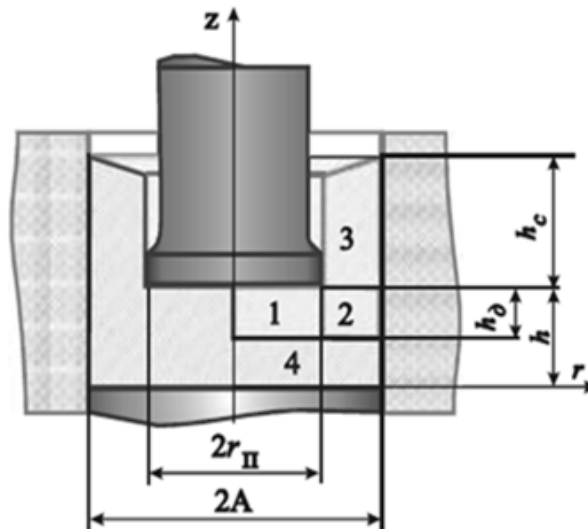


Рис. 3. Схема процесу радіального видавлювання при  $v_\theta = 0$

Для зон 2 і 3 компоненти  $v_{r1}$ ,  $v_{z2}$  та  $v_{r2}$  отримані на підставі закону сталості об'єму. Залежності для швидкостей течії металу, швидкостей деформації, інтенсивності швидкостей деформації дають можливість описати деформований стан у всьому об'ємі заготовки і перейти до побудови математичної моделі процесу.

Зона 1:  $h - h_d \leq z \leq h$ ,  $0 \leq r \leq r_n$ ;

$$v_{z1} = -\frac{v_n}{h} z - h_d - h ;$$

$$v_{r1} = \frac{v_n}{2h_d} \cdot r; \quad v_{\theta 1} = 0;$$

Зона 2:  $h - h_d \leq z \leq h$ ,  $r_n \leq r \leq A/\cos \theta$ ;

$$v_{z2} = -\frac{v_n}{h} - h_d - h \cdot f\theta;$$

$$v_{r2} = \frac{v_n}{2h_d} \cdot \frac{A^2 - r^2 \cos^2 \theta}{r} \cdot f\theta;$$

де  $f\theta = \frac{r_n^2 \cos^2 \theta}{A^2 - r^2 \cos^2 \theta}$ ;  $v_{\theta 2} = 0$ ;

Зона 3:  $h \leq z \leq h + h_c$ ,  $r_n \leq r \leq A/\cos \theta$ ;

$$v_{z3} = v_n \cdot f\theta; \quad v_{r3} = 0; \quad v_{\theta 3} = 0;$$

Зона 4:  $0 \leq z \leq h - h_d$ ,  $r_n \leq r \leq A/\cos \theta$ ;

$$v_{z4} = 0; \quad v_{r4} = 0; \quad v_{\theta 4} = 0,$$

де  $v_n$  – швидкість пуансона;

$h$  – глибина розповсюдження осередку пластичної деформації;

$h_c$  – висота стінки деталі;

$h$  – товщина донця;

$r, z, \theta$  – координати циліндричній системі координат.

Для побудови математичної моделі процесу використовуємо перше основне рівняння енергетичного метода [5]:

$$F_{\partial} = \frac{1}{v_n} \left[ \sum_{j=1}^J \left( \iiint \sigma_s(\varepsilon_i) \xi_i dV \right)_j + \sum_{m=1}^M \left( \iint \tau_k \sqrt{v_k^2 + v_l^2} dA \right)_m + \sum_{n=0}^N \left( \iint \tau_s \Delta v dG \right)_n \right] \quad (1)$$

де  $F$  – змінна в процесі деформації активна сила, Н;

$v_n$  – швидкість пуансона, м/с;

$\sigma(\varepsilon_i)$  – напруження течії як функція інтенсивності деформації  $\varepsilon_i$ , Па;

$V$  – об'єм зони в осередку деформації, м<sup>3</sup>;

$\kappa$  – напруження тертя на контактних поверхнях, Па;

$A$  – площа поверхні даного елемента деформованої заготовки, м<sup>2</sup>;

$v_k, v_l$  – швидкість уздовж узагальнених координатних осей  $k$  і  $l$ , м/с;

$S$  – напруження зсуву на поверхнях розриву швидкостей, Па;

$\Delta v$  – розрив швидкостей зсуву, м/с;

$G$  – площа поверхні розриву швидкостей, м<sup>2</sup>;

$J$  – кількість зон, на яку розбито осередок деформації;

$M$  – кількість поверхонь контактного тертя;

$N$  – кількість поверхонь розриву швидкостей.

Потужність зовнішньої деформуючої сили, яка прикладена до пуансона:

$$N_{12} = F_{\partial} \cdot v_n = \pi r_n^2 \cdot p v_n \sigma_s, \quad (2)$$

де  $p$  – відносне питоме зусилля деформації як функція безрозмірної глибини розповсюдження осередку пластичної деформації.

Виходячи з (1), можна записати:

$$\pi r_n^2 \cdot p v_n \sigma_s = \sum_{i=1}^{11} N_i \quad (3)$$

Підставивши до співвідношення (3) значення обчислених потужності внутрішніх сил опору деформації, контактного тертя і зсуву, які обчислені для кожної із зон деталі –  $N_i$ , розділивши праву і ліву частини на  $v_n \sigma_s$  і площу робочого торця пуансона  $\pi r_n^2$ , після перетворення до критеріального вигляду знаходимо  $p$

$$p = A_0 + A_1 h_{\partial} + A_2 / h_{\partial} \quad (4)$$

Величини  $A_0, A_1, A_2$  – розрахункові константи. Співвідношення (4) є математичною моделлю процесу радіального видавлювання (за умов  $v_{\theta} = 0$ ). Можна розглядати (4) як функцію властивостей матеріалу ( $\sigma_s$ ), що деформується, розмірів заготовки і інструменту (показаних на рис. 2), умов тертя на контактних поверхнях матриці і пуансона ( $\mu_1$  і  $\mu_2$ ), а також варіюваного параметра  $h_{\partial}$  – глибини розповсюдження осередку пластичної деформації.

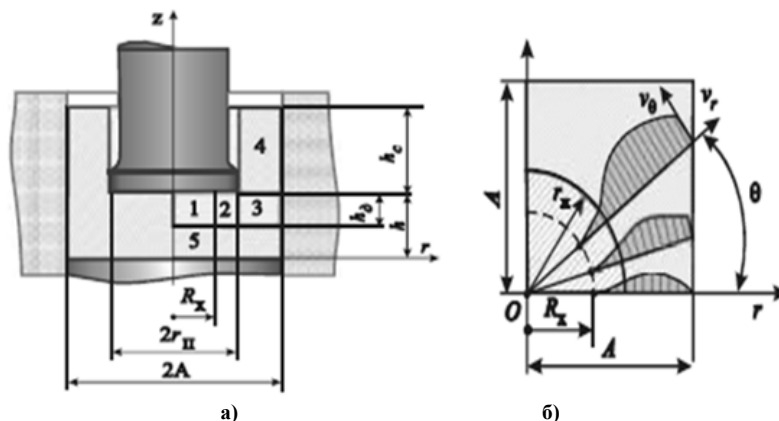


Рис. 4. Схема поділу деталі на зони (а) і схема тривимірної течії в зонах 1 і 3 (б) на другій стадії видавлювання

Залежність (4) дозволяє провести аналіз силового режиму видавлювання і кінематики плинину металу, визначити відносне питоме зусилля деформації  $p$ , побудувати поля швидкостей для зон 1 – 4, а вже за цими даними розрахувати повне зусилля деформації  $F_{\partial}$ .

Показано, що теоретичний аналіз процесів тривимірної течії, коли  $v_x \neq 0$ ;  $v_y \neq 0$ ;  $v_z \neq 0$  (або в циліндричній системі координат  $v_r \neq 0$ ;  $v_{\theta} \neq 0$ ;  $v_z \neq 0$ ) (яку умовно названо «вихровою», як це рекомендував А. Г. Овчінніков [4], може бути проведений у повному обсязі. Виконаний аналіз другої стадії, при якій

стінка, що сформувалася заввишки  $h_c$  із фестоном  $\Phi$ , впливає як жорсткий кінець і вирівнює по куту  $\theta$  швидкість  $v_z$ . На цій стадії розміри сформованого фестона вже не змінюються (що підтверджується експериментами), а оскільки товщина стінки по  $\theta$  змінна, то це призводить до істотної зміни характеру плинну – формування тривимірної течії, при якій в зонах 2 і 3 маємо  $v_\theta \neq 0$  (рис. 4, б). Для тривимірної течії (коли усі компоненти  $v_r, v_\theta$  і  $v_z$  відмінні від нуля) умова сталості об'єму має більш складний вигляд, ніж при радіальній:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) містить три невідомі функції  $v_r, v_\theta$  і  $v_z$ . Якщо задати дві функції  $v_\theta$  і  $v_z$ , то можна визначити і функцію  $v_r$  з умови сталості об'єму. Для цього можна використовувати підходящі функції, які описують плин металу в зонах 1, 2 і 3 (див. рис. 4, а). Зони 4 і 5 – жорсткі, тому що в них всі компоненти швидкостей деформацій, окрім  $v_{z4}$ , дорівнюють нулю. Крім того,  $v_{z4} = \text{const}$ . Підходящі функції мають задовольняти граничним умовам. Для зони 1 ( $0 \leq r \leq R_x$ ) характерна радіальна течія металу, яка описується функціями, лінійними відносно незалежних змінних  $r$  і  $z$ :

$$v_{z1} = -\frac{V_n}{h_\theta} [z - (h - h_\theta)]; \quad v_{r1} = \frac{rV_n}{2h_\theta}; \quad v_{\theta1} = 0; \quad (6)$$

де  $R_x$  – невідомий радіус, що розділяє області радіальної і тривимірної течії.

Для зон 2 і 3 ( $R_x \leq r \leq r_n$ , а також  $r_n \leq r \leq A/\cos(\theta)$ ) характерна вихрова течія, яку можна описати складними підходящими функціями. Швидкості  $v_{z2}$  та  $v_{z3}$  легко визначити з умов сталості об'єму, а функцію для швидкості  $v_{\theta2}$  можна задати у вигляді підходящої із п'ятьма параметрами ( $a_0, a_1, a_2, a_3$  та  $\lambda$ ), які треба варіювати, щоб отримати  $\min(F_\theta)$ :

$$v_{z2} = -\frac{V_n}{h_\theta} [z - (h - h_\theta)]; \quad v_{z3} = \frac{V_n}{h_\theta} [z - (h - h_\theta)] \frac{\pi r_n^2}{4A^2 - \pi r_n^2}; \quad (7)$$

$$v_{\theta2} = [a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3] (\sin 4\theta + \lambda \sin 8\theta) \cdot v_n; \quad v_{\theta3} = v_{\theta2}; \quad (8)$$

де  $r, \theta$  і  $z$  – незалежні змінні;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  і  $\lambda$  – варійовані параметри.

З попередніх експериментальних досліджень встановлено, що  $0 < \lambda < 0,55$ . Функції  $v_{r2}$  і  $v_{r3}$  для зон 2 і 3 можна знайти з умови сталості об'єму:

$$v_{r2} = -\frac{1}{r} \left[ \int \left( \frac{\partial v_{z2}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta2}}{\partial \theta} \right) \cdot r dr + C_2 \right]; \quad v_{r3} = -\frac{1}{r} \left[ \int \left( \frac{\partial v_{z3}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta3}}{\partial \theta} \right) \cdot r dr + C_3 \right]; \quad (9)$$

Інтегрування (9) при врахуванні граничних умов за зонами призводить до отримання складних функцій загального вигляду:

$$v_{r2} = f_r(a_0, a_1, a_2, a_3, h_\theta, \theta, \lambda, R_x); \quad v_{r3} = f_r(a_0, a_1, a_2, a_3, h_\theta, \theta, \lambda, R_x), \quad (10)$$

де  $R_x$  – змінна, яка дозволяє визначити межу зон 1 і 2, виходячи з граничних умов  $0 \leq R \leq r_x$ .

Функції швидкостей  $v_\theta$  і  $v_r$  мають наступні властивості:

- 1) вихрова течія (коли  $v_\theta \neq 0$ ) починається з деякої координати  $r = R_x$ ;
- 2) в точці  $r = R_x$  функція  $v_\theta$  неперервна;
- 3) метал заготовки не проникає через стінку матриці.

З цих властивостей отримуємо додаткові відомості про поведінку відповідних функцій  $v_\theta, v_r$  та додаткові умови:

- 1) при  $r = R_x$   $v_\theta = 0$ ;
- 2) при  $r = R_x$  маємо  $dv_\theta/dr = 0$ , а також  $d_2 v_\theta / d_r^2 = 0$ ;
- 3) при  $r = A/\cos(\theta)$   $v_{r3} / v_{\theta3} = \text{tg}(\theta)$ .

З цих додаткових умов витікає можливість скоротити кількість варійованих параметрів, зв'язавши їх через 2 узагальнених параметри. Це спрощує процес мінімізації функції (4) залежно від глибини розповсюдження осередку пластичної деформації (рис. 4), дає можливість прослідкувати перехід процесу деформації від початкової стадії (чисто радіальної течії) до другої стадії – тривимірної течії, коли  $v_\theta \neq 0$  як енергетично вигіднішому варіанті при достатній висоті жорсткого кінця (видавленої стінки).

Прийняті припущення для визначення параметрів функцій  $v_\theta$  і  $v_r$ , що мінімізують функцію  $p$  (4), дозволили виконати розрахунки і описати характер плинну металу на всіх стадіях видавлювання з достатньою точністю.

Інтенсивність швидкостей деформації  $\xi_i$  визначаємо за відомою формулою, яка містить компоненти тензора швидкостей деформації, визначувані згідно з рівняннями Коші.

Отримані залежності для швидкостей течії, швидкостей деформації, інтенсивності швидкостей деформації по кожній зоні дали можливість описати деформований стан у всьому об'ємі заготовки і перейти

до побудови математичної моделі процесу.

Потужність зовнішньої деформуючої сили, що прикладена до пуансона:

$$N_{14} = F_{\sigma} V_n = \pi r_n^2 \cdot p \cdot v_n \sigma_s \quad (11)$$

Виходячи з (1), можна записати:

$$\pi r_n^2 \cdot p \cdot v_n \sigma_s = \sum_{i=1}^{13} N_i \quad (12)$$

Підставивши у вираз (12) значення обчислених потужностей, розділивши його праву і ліву частини на  $v_n \sigma_s$  та площу робочого торця пуансона  $\pi r_n^2$ , перетворивши отриману складну функцію до критеріального виду, знаходимо відносно питоме зусилля деформації  $p$  для видавлювання в умовах тривимірної течії [5].

Розглянутий процес – це процес, в якому радіальна та «вихрова» течія протікає послідовно. Для аналізу та дослідження процесу обробки металу тиском використовувався пакет програм MathCAD – практичний і ефективний інструмент, який дозволяє прогнозувати характер формування при операціях обробки металів тиском без витрат на експериментальне дослідження.

В роботі проаналізовано технологічний процес виготовлення деталі типу «тонкостінний стакан» зі змінною по периметру товщиною стінки холодним зворотним видавлюванням а також вплив параметрів ХВ на механічні характеристики даного типу деталей.

### Висновки і перспективи розвитку напрямку.

1. Застосування активних сил контактного тертя дозволить зменшити питому силу на пуансоні на 20–30%.

2. При виборі оптимального кута конусності торця пуансона можна зменшити питому силу на пуансоні на 7–13%.

3. При виборі оптимальних розмірів намітки на торці заготовки можна зменшити питому силу на пуансоні на 4 - 15% . При дії активних сил тертя вплив технологічної намітки зменшується.

Всі перераховані вище фактори збільшують стійкість холодно-всадочного інструменту (матриць і пуансонів) на 40–45%. Стійкість технологічної оснастки напряму впливає на собівартість випуску заготовок у зв'язку із значними витратами на її виготовлення. В даний час для зниження деформуючої сили застосовують різні матеріали для змащування, форми інструменту, способи обробки поверхні заготовок, що дозволяють зменшити сили контактного тертя, а також проводять видавлювання з активними силами тертя. Крім того за рахунок значного покращення стану поверхні заготовок зменшується кількість відбракованої продукції з 15% до 5%.

### Література

1. Воронцов А.Л. Теория штамповки выдавливанием / А. Л. Воронцов. – М. : Машиностроение -1, 2004. – 721 с.
2. Холодная объемная штамповка / под ред. Г.А. Навроцкого. – М. : Машиностроение ,1987. – 384 с.
3. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
4. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка / под ред. Г.А. Навроцкого. – М. : Машиностроения, 1989. – 368 с.
5. Аналіз процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу / Кротенко Г. А. – Харків : НТУ «ХП», 2011. – 20 с.

Рецензія/Peer review : 23.11.2016 р.

Надрукована/Printed : 12.12.2016 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Гордєєв А.І