

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Кротенко Галина Анатоліївна

УДК 621.77

**АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВИДАВЛЮВАННЯ В УМОВАХ ТРИВИМІРНОЇ ТЕ-
ЧІЇ МЕТАЛУ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі обробки металів тиском Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Євстратов Віталій Олексійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри обробки металів тиском

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мовшович Олександр Якович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків,
професор кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка

кандидат технічних наук,
Алієва Лейла Іграмотдинівна,
Донбаська державна машинобудівна академія,
м. Краматорськ,
доцент кафедри обробки металів тиском

Захист відбудеться 29.06. 2011 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 27.05. 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.10

В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У різних галузях приладо- і машинобудування застосовуються порожнисті деталі, що мають неоднакову товщину стінки по периметру. Ці деталі можливо виготовляти переважно холодним видавлюванням, яке є маловідходним і високопродуктивним: при його застосуванні витрати металу у 2...3 рази менші, ніж при різанні. Видавлювання дозволяє отримувати деталі, що характеризуються високою зносостійкістю та міцністю.

Не зважаючи на значні переваги, застосування видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки стримується через те, що цей процес ще недостатньо досліджений, а отримані математичні моделі неадекватно його описують. Окрім великих навантажень під час видавлювання деталей цього класу, процес характеризується значною нерівномірністю деформації, тому висота деталі виходить змінною по периметру – утворюються так звані фестони, що призводить до зайвої витрати металу.

Особливості деформації (зокрема утворення фестонів) деталей із змінною товщиною стінки в сучасній науковій літературі проаналізовані або тільки експериментально, або з використанням допущення про плоску чи вісесиметричну течію металу. Опубліковані наукові результати носять вузько конкретний характер (кожне дослідження – для певної деталі) і мають певну межу використання. Тому актуальною є задача обґрунтування розрахунків процесу тривимірної течії металу на прикладі видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки на основі математичного моделювання процесу холодного видавлювання металів. Вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі обробки металів тиском НТУ «ХПІ». Здобувач брав участь у виконанні держбюджетних НДР МОН України: “Розробка високопродуктивних матеріало- і енергозощаджувальних технологічних процесів обробки металів тиском, конструювання високостійких штампів, створення САПР в ОМТ”, “Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій і унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних і надскладних механічних систем” (ДР №0107U006813), та договорів про співробітництво з ДП “Завод ім. В. О. Малишева”, ВАТ “Харківський тракторний завод ім. С. Орджонікідзе”, “Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут” (м. Маріуполь).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – розробка рекомендацій з удосконалення технології виготовлення широкого класу деталей із змінною по периметру товщиною стінки та конструювання штампів на базі науково обґрунтованих математичних моделей процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу.

Для досягнення зазначеної мети розв'язані наступні задачі:

- аналіз деформованого стану в процесах видавлювання деталей в умовах тривимірної течії металу;
- розробка математичних моделей трьох процесів: видавлювання в умовах радіальної течії металу; видавлювання в умовах тривимірної течії металу; виготовлення заготовки в умовах тривимірної течії металу;
- числові розрахунки процесу формозміни і силового режиму процесу видавлювання;
- експериментальні дослідження формозміни і енергосилових параметрів процесу видавлювання в умовах тривимірної течії металу;
- розробка рекомендацій з виготовлення деталей видавлюванням в умовах тривимірної (невісесиметричної) течії металу, а також з конструювання штампів.

Об'єкт дослідження – процес тривимірної течії металу в технологічних операціях обробки металів тиском (ОМТ) при видавлюванні деталей та заготовок.

Предмет дослідження – кінцева формозміна і силовий режим видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінок в процесах тривимірної течії металу.

Методи дослідження. Основу для теоретичного дослідження склали фундаментальні положення теорії обробки металів тиском, механіки суцільних середовищ. Варіаційний метод теорії ОМТ застосований для теоретичного аналізу кінематики течії металу та визначення енергосилових параметрів процесу в умовах тривимірної течії металу. Для визначення поля швидкостей використано умову сталості

об'єму, в якому враховані усі три компоненти течії v_r , v_θ , v_z , які відмінні від нуля. Метод Сімпсона для чисельного інтегрування, для визначення раціональних значень варійованих параметрів – метод типу Монте-Карло. Методи координатних сіток для експериментального дослідження деформування металу в процесі видавлювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному: створенні науково обґрунтованих рекомендацій з удосконалення процесу видавлювання широкого класу деталей зі змінною по периметру товщиною стінок на основі удосконалених математичних моделей процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу. *Вперше:*

- для створення математичних моделей процесу тривимірної течії металу використано варіаційний метод і показано, що процеси характеризуються специфічною тривимірною течією металу, яка не є вісесиметричною і до цього часу не враховувалась в теоретичних рішеннях;

- виконаний теоретичний аналіз процесу видавлювання, який враховує особливості формування осередку деформації, кінцеву формозміну та силовий режим в умовах тривимірної течії металу;

- на основі теоретичного і експериментального дослідження показано, що процес видавлювання деталі із змінною по периметру товщиною стінки протікає у дві стадії: перша стадія, впродовж якої частково формується стінка і утворюється фестон – радіальна течія ($v_\theta = 0$); друга стадія, протягом якої остаточно формується стінка і фестон не збільшується – тривимірна течія ($v_\theta \neq 0$). У цьому – відмінність від попередніх двовимірних та плоских моделей процесу.

- встановлено, що тонкостінні циліндричні деталі за певних умов можна отримувати з квадратної заготовки.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної, електронної та інших галузей промисловості складає методика розрахунку формозміни і силового режиму видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки, такі як корпусні деталі з порожнинами, яка реалізована у програмному пакеті MathCAD. Особливо важливим є використання цієї методики для видавлювання деталей з коштовних алюмінієвих та магнієвих сплавів, при виготовленні яких утворення фестонів значно збільшує витрати матеріалу та вартість механічного оброблення.

Розроблені в дисертації алгоритми і числові моделі, що забезпечують визначення формозміни (висоти фестонів), потужності, роботи та зусилля деформації, які необхідні для формування заготовок і деталей при невісесиметричній (тривимірній) течії металу, можна використовувати у відділах технолога машинобудівних та приладобудівних підприємств, в КБ та НДІ при дослідженні процесів видавлювання.

Запропоновані в дисертації рекомендації з розроблення технологічних процесів і конструкцій штампів дозволяють отримати деталі медичного і парфумерного призначення (виготовлення тьюбиків) з квадратної заготовки та характеризуються високим техніко-економічними показниками. Результати роботи впровадженні на ДП “Завод ім. В.О. Малишева” та в навчальний процес кафедри обробки металів тиском НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації, що винесені на захист, одержані здобувачем самостійно. Зокрема: розроблена схема і математична модель процесу видавлювання деталі із змінною по периметру товщиною стінки з урахуванням тривимірної течії металу; розроблена математична модель процесу формування круглої деталі з квадратної заготовки в умовах тривимірної течії металу; виконано розрахунок процесу формозміни та силового режиму видавлювання деталі зі змінною по периметру товщиною стінки, а також видавлювання тонкостінного стакану з квадратної заготовки; розроблена методика проведення експериментів дослідження формозміни і енергосилових параметрів процесу видавлювання в умовах тривимірної течії металу і аналізу їхніх результатів; запропоновані технології і конструкції штампів для виробництва деталей і заготовок холодним видавлюванням. Загальна постановка задачі та обговорення результатів дисертаційних досліджень погоджені з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались на: Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 1997 – 2010 рр.), Науково-технічних конференціях “Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві” (м. Харків, 2001 – 2002 рр., 2005 р.); Міжнародних конференціях “Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні” і “Проблеми і

перспективи розвитку процесів і машин обробки тиском” (м. Краматорськ, 2002 – 2003 рр., 2006 р., 2010 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Прогрессивные методы и технологическая оснастка процессов обработки металлов давлением” (м. Санкт-Петербург, Росія, 2005 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Нові рішення в сучасних технологіях” (м. Харків, 2009 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 15 наукових працях, з них 8 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 186 сторінок: з них 73 рисунків по тексту; 29 рисунків на окремих 14 сторінках; 3 таблиці по тексту; 3 додатки на 8 сторінках; списку використаних літературних джерел з 110 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку технології і теорії процесів холодного видавлювання. Значний внесок у розвиток теорії та практики видавлювання зробили Е. Зібель, Х. Кудо, О. А. Ганаго, І. Я. Тарновський, Л. В. Прозоров, А. Г. Овчинников, Л. Г. Степанський, та інші.

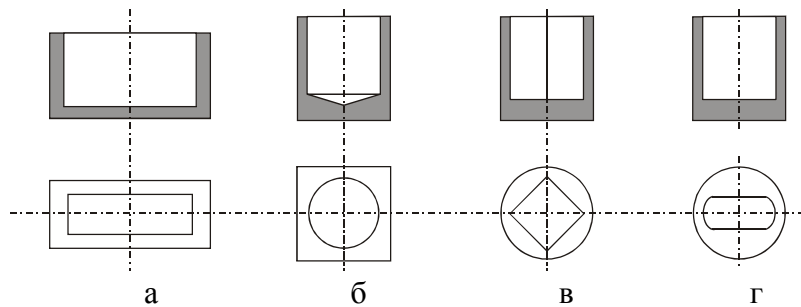


Рис. 1. Приклади симетричних деталей із змінною по периметру товщиною стінки

Проаналізовано сучасні способи інтенсифікації процесів видавлювання деталей зі змінною по периметру товщиною стінки. Встановлено, що процеси видавлювання подібних деталей вивчено лише наближено, бо складні процеси видавлювання зводили до плоских або вісесиметричних, де $v_r \neq 0$; $v_z \neq 0$; $v_\theta = 0$ в циліндричній системі координат.

Для удосконалення технологічних процесів видавлювання деталей із змінною товщиною стінки, які характеризуються значною нерівномірністю течії металу, необхідно застосувати нові підходи до аналізу та створити узагальнені математичні моделі робочих процесів, які дозволяють враховувати тривимірну течію металу.

Показано, що в найбільшій мірі задачам дослідження відповідає варіаційний (енергетичний) метод, який передбачає використання кінематично можливих полів швидкостей, а також принципу мінімуму повної енергії деформації та склав основу математичного моделювання процесів видавлювання деталей із змінною товщиною стінки

Показано, що для рішення задач аналізу перспективно використати ресурси спеціалізованих програмних засобів, наприклад, пакету MathCAD.

У **другому розділі** розроблено геометричні моделі процесів видавлювання вісесиметричних деталей із змінною по периметру товщиною стінки, які покладені в основу узагальнених математичних моделей процесів видавлювання (рис. 2, 3 та 4).

Теоретично доведено, що процеси видавлювання деталей із змінною по периметру тов-

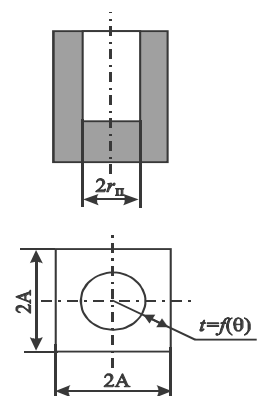


Рис.2. Типова деталь із змінною товщиною стінки

щиною стінки характеризуються специфічною тривимірною течією металу. Ця течія не є віссиметричною, що до цього часу не враховувалось в теоретичних рішеннях. Показано, що видавлювання проходить у дві стадії: перша, що відбувається як радіальна течія металу, на якій здійснюється формування фестону по верхньому торчаку 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:

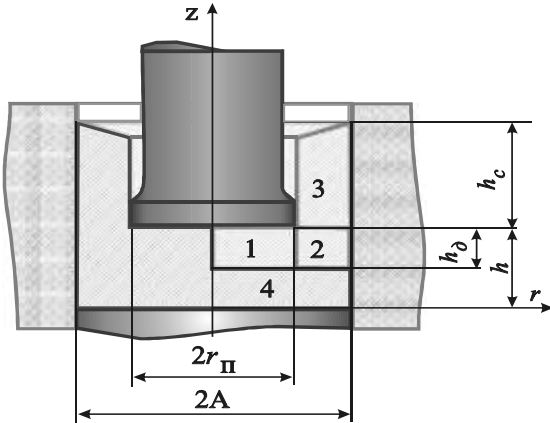


Рис.3. Схема процесу радіального видавлювання при $v_\theta = 0$

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

$$v_{z1} = -\frac{v_n}{h} z - h_d - h, \quad v_{r1} = \frac{v_n}{2h_d} \cdot r; \quad v_{\theta 1} = 0;$$

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

$$v_{z2} = \frac{v_n}{h} \left[h - h_d - h \cdot f(\theta) \right], \quad v_{r2} = \frac{v_n}{2h_d} \cdot \frac{A^2 - r^2 \cos^2 \theta}{r} \cdot f(\theta),$$

$$\text{де } f(\theta) = \frac{r_n^2 \cos^2 \theta}{A^2 - r_n^2 \cos^2 \theta}, \quad v_{\theta 2} = 0;$$

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

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

Тут v_n – швидкість пуансона; h_d – глибина розповсюдження осередку пластичної деформації; h_c – висота стінки деталі; h – товщина донця; r, z, θ – координати циліндричній системі координат.

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.

Для побудови математичної моделі процесу використовуємо перше основне рівняння енергетичного метода

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

Тут F_d – змінна в процесі деформації активна сила, Н; v_n – швидкість пуансона, м/с; $\sigma_s(\varepsilon_i)$ – напруження течії як функція інтенсивності деформації ε_i , Па; V – об'єм зони в осередку деформації, м³; τ_k – напруження тертя на контактних поверхнях, Па; A – площа поверхні даного елемента деформованої заготовки, м²; v_k, v_l – швидкість уздовж узагальнених координатних осей k і l , м/с; τ_s – напруження зсуву на поверхнях розриву швидкостей, Па; Δv – розрив швидкостей зсуву, м/с; G – площа поверхні розриву швидкостей, м²; 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

$$N_{12} = F_d v_n = \pi r_n^2 \bar{p} v_n \sigma_s,$$

де $\bar{p}$ – відносне питоме зусилля деформації як функція безрозмірної глибини розповсюдження осередку пластичної деформації $\bar{h}_d = h_d/h$. Виходячи з (1), можна записати:

$$\pi_n^2 \bar{p} v_n \sigma_s = \sum_{i=1}^{11} N_i \quad (2)$$

Підставивши до співвідношення (2) значення обчислених потужності внутрішніх сил опору деформації, контактної 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 торчака пуансона π_n^2 , після перетворення до критеріального вигляду знаходимо $\bar{p}$

$$\bar{p} = A_0 + A_1 \bar{h}_\partial + A_2 / \bar{h}_\partial \quad (3)$$

Величини A_0, A_1, A_2 – розрахункові константи. Співвідношення (3) є математичною моделлю процесу радіального видавлювання (за умов $v_\theta = 0$). Можна розглядати (3) як функцію властивостей матеріалу (σ_s), що деформується, розмірів заготовки і інструменту (показаних на рис. 3), умов тертя на контактних поверхнях матриці і пуансона (μ_1 і μ_2), а також варійованого параметра h_∂ – глибини розповсюдження осередку пластичної деформації. Залежність (3) дозволяє провести аналіз силового режиму видавлювання і кінематики плин у металі, визначити відносне питоме зусилля деформації $\bar{p}$, побудувати поля швидкостей для зон 1 – 4, а вже за цими даними розрахувати повне зусилля деформації F_∂ .

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. Овчинников), може бути проведений у повному обсязі.

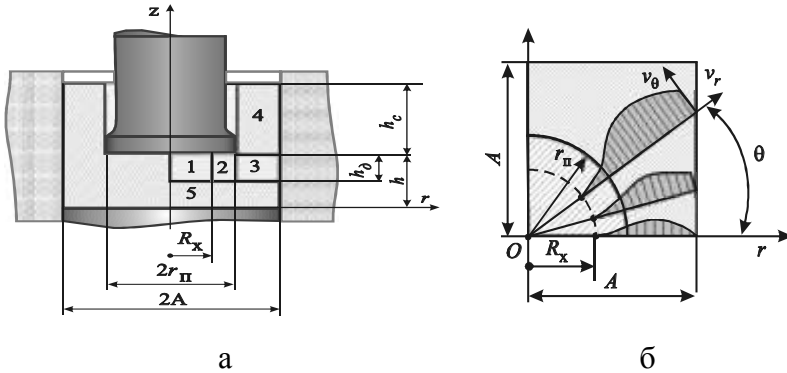


Рис. 4. Схема поділу деталі на зони (а) і схема тривимірної течії в зонах 2 і 3 (б) на другій стадії видавлювання

змінна, то це призводить до істотної зміни характеру плин – 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_θ і v_z відмінні від нуля) умова сталості об'єму має більш складний вигляд, ніж при радіальній

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) = 0 \quad (4)$$

Рівняння (4) містить три невідомі функції v_r, v_θ і v_z . Якщо задати дві функції v_θ і v_z , то можна визначити і функцію v_r з умови сталості об'єму.

Для цього можна використовувати підходящі функції, які описують плин металі в зонах 1, 2 і 3 (див. рис. 4, а). Зони 4 і 5 – жорсткі, тому що в них всі компоненти швидкостей деформації, 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 металі, яка описується функціями, лінійними відносно незалежних змінних r і z :

$$v_{z1} = -\frac{v_n}{h_\partial} [z - (h - h_\partial)]; \quad v_{r1} = v_n r / 2h_\partial; \quad v_{\theta 1} = 0.$$

Тут 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 $v_{\theta 2}$ можна задати у вигляді підходящої із п'ятьма параметрами (a_0, a_1, a_2, a_3 та λ), які треба варіювати, щоб отримати $\min(F_0)$:

$$v_{z2} = -\frac{v_n}{h_0}[z - (h - h_0)]; \quad v_{z3} = \frac{v_n}{h_0}[z - (h - h_0)] \frac{\pi_n^2}{4A^2 - \pi_n^2};$$

$$v_{\theta 2} = [a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3](\sin 4\theta + \lambda \sin 8\theta) \cdot v_n; \quad v_{\theta 3} = v_{\theta 2}, \quad (5)$$

де r, θ и z – незалежні змінні; a_0, a_1, a_2, a_3 и λ – варійовані параметри.

З попередніх експериментальних досліджень встановлено, що $0 < \lambda < 0,55$.

Функції v_{r2} и v_{r3} для зон 2 і 3 можна знайти з умови сталості об'єму

$$v_{r2} = -\frac{1}{r} \left[\int \left(\frac{\partial v_{z2}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta 2}}{\partial \theta} \right) r dr + C_2 \right]; \quad v_{r3} = -\frac{1}{r} \left[\int \left(\frac{\partial v_{z3}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta 3}}{\partial \theta} \right) r dr + C_3 \right]. \quad (6)$$

Інтегрування (6) при врахуванні граничних умов по зонам призводить до отримання складних функцій загального вигляду:

$$v_{r2} = f_r(a_0, a_1, a_2, a_3, h_0, \theta, \lambda, R_x); \quad v_{r3} = f_r(a_0, a_1, a_2, a_3, h_0, \theta, \lambda, R_x), \quad (7)$$

Тут R_x – змінна, яка дозволяє визначити межу зон 1 і 2, виходячи з граничних умов: $0 \leq R_x \leq r_n$.

Функції швидкостей v_θ и 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_θ неперервна;
- 3) метал заготовки не проникає через стінку матриці.

З цих властивостей отримуємо додаткові відомості про поведінку відповідних функцій

v_θ, 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 $d^2v_\theta/dr^2 = 0$;
- 3) при $r = A/\cos(\theta)$ $v_{r3}/v_{\theta 3} = \tan(\theta)$.

З цих додаткових умов витікає можливість скоротити кількість варійованих параметрів, зв'язавши їх через 2 узагальнених параметри. Це спростує процес мінімізації функції (8) 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_θ и v_r , що мінімізують функцію $\bar{p}$ (8), дозволили виконати розрахунки і описати характер плинку металу на всіх стадіях видавлювання з достатньою точністю.

Інтенсивність швидкостей деформації ξ_i визначаємо за відомою формулою, яка містить компоненти тензора швидкостей деформації, визначувані згідно з рівняннями Коші. Вирази для інтенсивності швидкості деформації для зон 2 і 3 визначали числовим способом за допомогою пакету програм MathCAD.

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

$$N_{14} = F_\theta v_n = \pi_n^2 \bar{p} v_n \sigma_s.$$

$$\text{Виходячи з (1), можна записати:} \quad \pi_n^2 \bar{p} v_n \sigma_s = \sum_{i=1}^{13} N_i. \quad (8)$$

Підставивши у вираз (8) значення обчислених потужностей, розділивши його праву і ліву частини на $v_n \sigma_s$ та площу робочого торчка пуансона π_n^2 , перетворивши отриману складну функцію до критеріального виду, знаходимо відносне питоме зусилля деформації $\bar{p}$ для видавлювання в умовах тривимірної течії.

Розглянутий процес – це процес, в якому радіальна та «вихрова» течія протікає послідовно.

Але є великий клас задач, в яких течія з самого початку здійснюється як «вихрова» (рис. 5). Аналіз цієї задачі, яка має значне практичне значення, теж наведений у роботі. Як правило, заготовки для формотвірних операцій холодного листового штампування, а також для видавлювання, коли відносна висота заготовки невелика $h = (0,1 \dots 0,2)D$, отримують вирубанням з листа, смуги або стрічки. При цьому велика увага приділяється оптимальному розкроюванню. Якщо заготовки мають квадратну або шестигранну форму, то використовують раскроювання без перекладок (перемичок). При цьому для квадратних заготовок коефіцієнт використання металу наближається до 100%. Якщо ж заготовки мають круглу форму, то (навіть при багаторядному розкроюванні) коефіцієнт використання металу не перевищує 72%. Таке неекономне витрачання металу не можна визнати доцільним, особливо при штампуванні коштовних кольорових металів і їх сплавів. Тому пропонується ефективніший спосіб виготовлення круглих низьких заготовок з квадратної заготовки і одночасне видавлювання деталі типа стакан. Цей процес характеризується особливим плином металу, аналіз якого можливий лише на базі математичного моделювання тривимірної течії металу. Задачі, в яких має місце тривимірна невісесиметрична течія, з достатньою точністю були вирішені енергетичним методом в циліндричній системі координат у класичному варіаційному вигляді.

Схема такої операції представлена на рис. 5. Поділ заготовки на області базується на результатах, які отримані в ході попередніх експериментів, що показали, як саме протікає процес і які підходящі функції можна прийняти, щоб описати поле швидкостей. У зв'язку з симетрією деталі можна розглядати лише 1/8 її частини (див. рис. 5). В процесі деформації координати будь-якої точки в осередку деформації змінюються: r – від 0 до r_m ; θ від 0 до $\pi/4$; z від 0 до h . В деякий момент часу осередок деформації поділили на дві зони: зону вихрової і радіальної течії металу 1, де θ змінюється від 0 до θ_3 , та зону чисто вихрової течії 2, де θ змінюється від θ_3 до $\pi/4$. При цьому хорда A_0 стягується, а проміжок між стороною заготовки і стінкою матриці зменшується від s_0 (див. рис.5, а) до s (див. рис. 5, б) і далі до нуля. Зважаючи на граничні умови в зонах 1 і 2, в прийнятій розрахунковій схемі плин металу може бути описаний наступними залежностями:

зона 1: $0 \leq r_1 \leq \frac{r_m - s}{\pi/4 - \theta_3}$; $\theta_3 - \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$; $0 \leq z \leq h$;

$$v_{r1} = \frac{v_n r \pi}{8 h \alpha}; \quad v_{\theta 1} = \frac{v_n r}{h} \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right) \left(\frac{\pi}{4 \alpha} - 1 \right); \quad v_{z1} = -\frac{v_n}{h} z;$$

при $\theta = \frac{\pi}{4} \rightarrow v_\theta = 0$,

зона 2: $0 \leq r_2 \leq r_m$; $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4} - \alpha$; $0 \leq z \leq h$;

$$v_{r2} = 0; \quad v_{\theta 2} = \frac{v_n r}{h} \theta; \quad v_{z2} = -\frac{v_n}{h} z;$$

при $\theta = \frac{\pi}{4} - \alpha \rightarrow v_{\theta 2} = \frac{v_n r}{h} \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right)$.

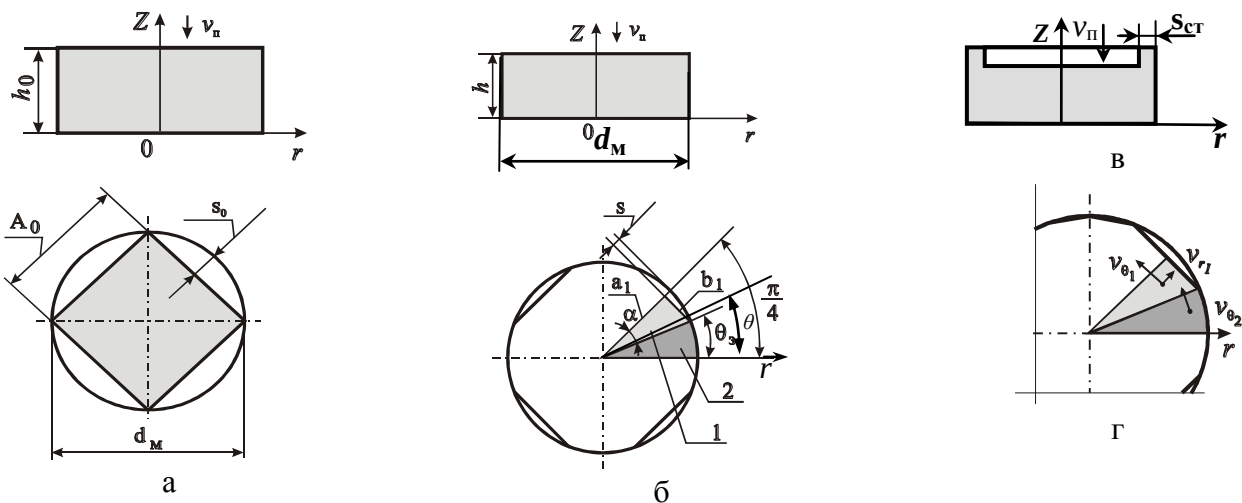


Рис. 5. Схема стискання квадратної заготовки в циліндричній матриці (а), схема поділу заготовки на зони (б), схема формування стінок (в) і схема течії металу в зонах 1 і 2 (г).

Тут s – незаповнення контура матриці $s = r_m \cdot (1 - \cos \alpha)$,

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{4} - \theta_3 \right), \quad b_1 = r_m \sin \alpha; \quad a_1 = r_m \cos \alpha; \quad d_m = 2r_m = A_0 \sqrt{2}.$$

Компоненти швидкостей течії v_r, v_θ, v_z , що входять в основний вираз енергетичного методу, представлені у вигляді так званих підходящих функцій, дотримуючи граничні умови і умови сталості об'єму. Кут α визначаємо з умови сталості об'єму початкової і деформованої заготовки

$$\frac{A_0^2 \cdot h_0}{8 \cdot r_m^2 \cdot h_0 - \Delta h} - \frac{\sin 2\alpha}{4} - 0,5 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) = 0. \quad (9)$$

Отримані залежності для компонент швидкостей течії, швидкостей деформації, інтенсивності швидкостей деформації дають можливість описати деформований стан у всьому об'ємі заготовки і перейти до побудови математичної моделі процесу

$$\bar{p} = \frac{1}{v_\pi \sigma_s \cdot A_3} \cdot \sum_{i=1}^8 N_i. \quad (10)$$

Тут N_i – потужності внутрішніх сил опору деформації, контактної тертя і зсуву, які обчислені для кожної із зон деталі Н·м/с; v_π – швидкість пуансона, м/с; σ_s – напруження течії заготовки, Н/м²; A_3 – площа заготовки, яка відповідає певному моменту деформації і легко визначається з умови сталості об'єму

$$A_3 = A_0 h_0 / (h_0 - \Delta h_3), \text{ м}^2.$$

Співвідношення (10) є функція властивостей матеріалу, що деформується (σ_s), розмірів заготовки (A_3 і Δh) і інструменту (r_m), умов тертя на контактних поверхнях матриці і пуансона (μ_1 і μ_2). Це співвідношення є неявна функція кута α , яку можна розглядати як математичну модель процесу стискання квадратної заготовки в циліндричній матриці. Отримана функція не має аналітичного рішення відносно α , тому моделюється чисельно за допомогою пакету MathCAD.

У **третьому розділі** розглянуті процеси видавлювання деталі із змінною по периметру товщиною стінки (див. рис. 2, 3) при $v_\theta = 0$. Рішення отримані на базі розрахункової схеми, яка передбачає радіальну течію металу.

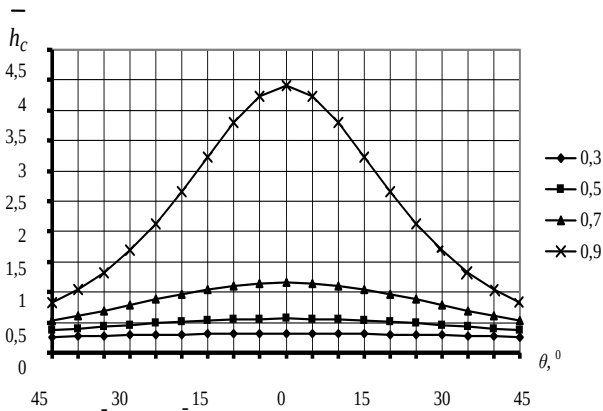


Рис. 6. Графік зміни відносної висоти стінки деталі $\bar{h}_c$ залежно від кута θ при різних відносних радіусах пуансона $\bar{r}_\pi$

чим тонша стінка деталі,

тим більший фестон. При $\bar{r}_\pi = 0,9$, висота фестона в 10 разів більша ніж при $\bar{r}_\pi = 0,3$.

Розрахунок процесу видавлювання деталі за різних умов тертя показав, що коефіцієнт тертя несуттєво впливає на висоту фестона. Цей вплив більшою мірою відзначається для товстостінних деталей ($\bar{r}_\pi = 0,3 \dots 0,5$) (рис. 7).

Теоретичний аналіз формозміни при $v_\theta = 0$ показав, що відносна висота стінки деталі $\bar{h}_c = h_c / A$ залежить від кута θ . Причому максимальна висота $\bar{h}_{c \max}$ виходить при θ , яке дорівнює або 0° , або 90° . Це відповідає найменшій товщині стінки коробки. Мінімальна висота $\bar{h}_{c \min}$ виходить при $\theta = 45^\circ$, тобто в кутах деталі. Що відповідає картині, яка отримана в результаті проведеного попереднього експерименту. Оскільки деталь симетрична, достатньо на графіках представити результати лише для $1/4$ деталі, де кут змінюється від -45° до $+45^\circ$ (рис. 6). Як видно з рис. 6 висота стінки, а отже і висота фестона тим більша, чим більше співвідношення $\bar{r}_\pi = r_\pi / A$, тобто,

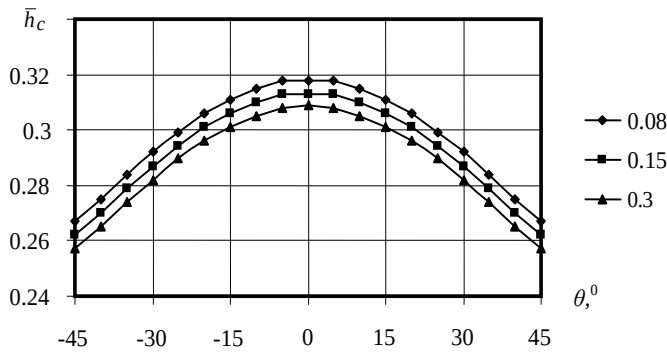


Рис. 7. Графік залежності відносної висоти стінки $\bar{h}_c = h_c/h$ від кута θ при різних коефіцієнтах тертя μ : (в усіх випадках $\bar{r}_n = 0,3$)

графіки залежності відносного питомого зусилля деформації $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\Delta \bar{h} = \Delta h/A$ для схеми, де $v_r \neq 0$, $v_z \neq 0$ і $v_\theta = 0$, представлені на рис. 8.

При видавлюванні деталі (див. рис. 2) за схемою радіальної течії, в зоні 3 (див. рис. 3) у зв'язку з тим, що $v_{z3} = v_n \cdot f(\theta)$, відбуваються значні зсуви при формуванні стінки заготовки. Це впливає на відносне питоме зусилля деформації $\bar{p}$, і саме тому на ділянці AB значення $\bar{p}$ не залишається незмінним при постійній висоті осередку пластичної деформації $\bar{h}_o$ залежно від ходу пуансона (див. рис. 8).

Як вже наголошувалося вище, розрахункова схема, де $v_r \neq 0$, $v_z \neq 0$ і $v_\theta = 0$ неадекватно описує складний процес видавлювання, тому прийняте допущення $v_\theta = 0$ відповідає лише початковому етапу процесу видавлювання, на якому формується осередок деформації і утворюється фестон, а отже і силовий режим видавлювання відрізнятиметься від традиційної схеми. Тому є усі підстави для розгляду моделі плинності металу за умови $v_\theta \neq 0$.

Показано, що відносне питоме зусилля деформації за схемою тривимірної течії металу виражається досить складною функцією і залежить від наступних параметрів: v_n , r , θ і z (це незалежні змінні); a_0 , a_1 , a_2 , a_3 ; R_x і λ – варійовані параметри. Це перша істотна трудність при аналізі тривимірної течії.

Як відомо, вирішуючи задачу енергетичним методом, для визначення варійованих параметрів необхідно використовувати принцип мінімуму повної енергії деформації. Це означає, що всі варійовані параметри $a_0, \dots, a_3$; R_x , λ можна визначити з системи рівнянь, яка відповідає другому основному рівнянню енергетичного методу: $\frac{\partial}{\partial a_i} P_o = 0$. Ця система нелінійна, а це друга значна

трудність аналізу тривимірної течії. Тому доводиться чисельно мінімізувати зусилля деформації і звідси визначати значення варійованих параметрів за допомогою вбудованої функції *minimize* пакету MathCAD. Процедура виявляється дуже трудомісткою. Проте вона дозволяє виконати розрахунки і описати характер плинності металу на всіх стадіях видавлювання з достатньою точністю. Гра-

Відомі роботи з обробки металів тиском дали можливість стверджувати, що при видавлюванні будь-якої деталі з високої заготовки для опису плинності металу характерний традиційний поділ процесу на три стадії: 1) початкова нестационарна, на якій формується осередок деформації; а зусилля інтенсивно зростає від 0 до $\bar{p}_{CT}$; 2) стаціонарна, на якій відбувається формування деталі і висота осередку деформації залишається постійною, а зусилля деформації $\bar{p}_{CT}$ залишається незмінним, 3) кінцева нестационарна стадія, коли товщина донця деталі зменшується, а зусилля деформації інтенсивно зростає. Розрахункові

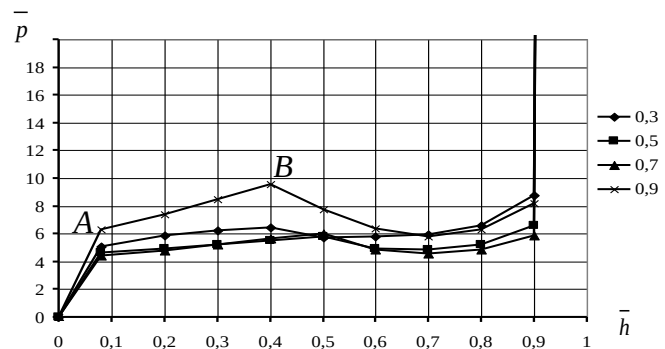


Рис. 8. Графіки залежності відносного питомого зусилля видавлювання деталі $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\bar{h}$ при $\mu = 0.08$ для різних значень $\bar{r}_n$ за умов радіальної течії

фіки залежності відносного питомого зусилля деформації $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\bar{h}$ при $\mu=0.08$ представлені на рис. 9.

Узагальнення отриманих розрахунків дозволило встановити, що при $\Delta h^* \approx 0,07h$ спостерігається перехід від радіальної до тривимірної течії, яка енергетично вигідніша за радіальну. Графіки цього переходу при видавлюванні деталі у вигляді квадратної призми з циліндричним отвором при $\mu = 0.08$ представлені на рис. 10.

Значення варійованих параметрів у функціях швидкостей наведені в таблиці.

$\bar{r}_n$	a_0	a_1	a_2	a_3	λ	$\bar{R}_x$	$\bar{h}_\delta$
0.3	$4.23 \cdot 10^{-4}$	-0.143	0.124	0.88	0.16	0.06	0.50
0.5	$5.08 \cdot 10^{-3}$	-0.054	0.156	0.96	0.25	0.20	0.25
0.7	0.026	-0.156	0.303	1.05	0.55	0.42	0.25
0.9	0.054	-0.226	0.313	5.11	0.55	0.72	0.35

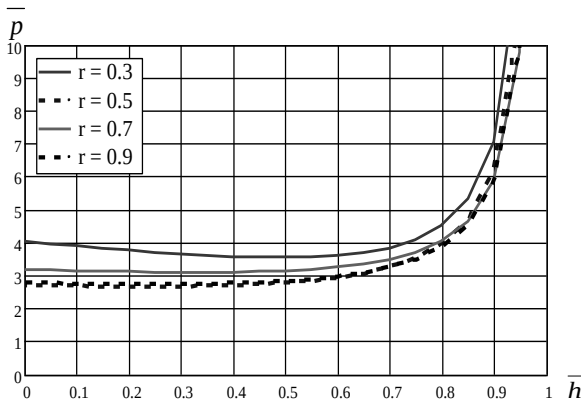


Рис. 9. Графік залежності відносного питомого зусилля $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\bar{h}$ для $\bar{r}_n = 0.3...0.9$ за умов тривимірної течії. $\mu = 0.08$

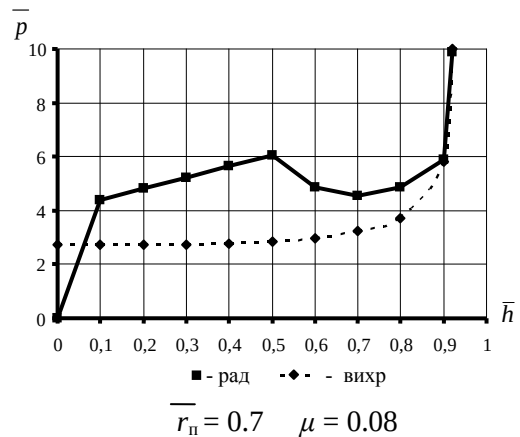


Рис. 10. Графік залежності відносного питомого зусилля $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\bar{h}$ при радіальній та тривимірній течії металу

Чисельна реалізація процесу виготовлення круглої заготовки в штампі виконана за допомогою пакету MathCAD.

На першому етапі проведений аналіз процесу заповнення матриці при стисканні заготовки. Розрахунок незаповнення контуру матриці s залежно від кута заповнення порожнини матриці θ_3 наданий на рис.11.

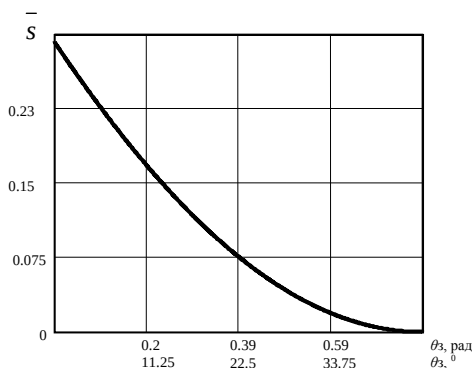


Рис. 11. Графік залежності ступеня заповнення матриці s від кута заповнення θ_3

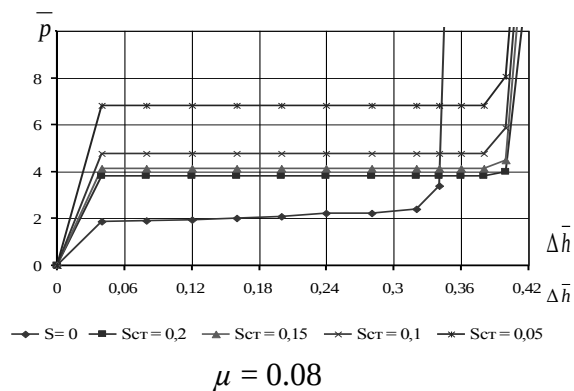


Рис. 12. Графік залежності відносного питомого зусилля деформації заготовки $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\Delta \bar{h}$ для різних товщин стінки

Силовий режим процесу, що представлений у вигляді залежності відносного питомого зу-

силля деформації $\bar{p}$ від відносного ходу пуансона $\Delta \bar{h}$ показаний на рис. 12. Тут нижні криві описують тривимірну течію квадратної заготовки, а верхня – видавлювання стаканів з круглої заготовки (коли $\theta_3=45^\circ$) за традиційною схемою.

У **четвертому розділі** описане експериментальне дослідження процесу видавлювання в умовах тривимірної течії металу.

Експериментальне дослідження проводили в лабораторії кафедри ОМТ у таких напрямках. Спочатку було перевірено, що фестон формується на перших етапах деформування деталі. Для цього на товстій та тонкій стінках (в кутку при $\theta=45^\circ$ та в середині стінки при $\theta=0^\circ$) за допомогою хо-дографів вимірювали вертикальні переміщення Δh_A та Δh_B безпосередньо в процесі видавлювання. Для різних ступенів деформації отримали залежності, які можна узагальнити графіком, що показаний на рис. 13. Процес видавлювання деталі із змінною по периметру товщиною стінки йде в дві стадії: 1) спочатку відбувається радіальна течія і при цьому формується фестон Ф; 2) коли стінка стає досить високою, то зсуви у ній стають енергетично не вигідні: після цього фестон не збільшується, а процес течії переходить у тривимірний.

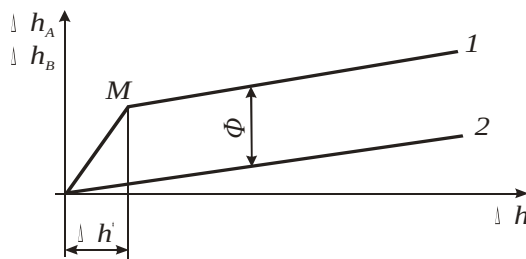


Рис. 13. Графік залежності вертикальних переміщень стінки від ходу пуансона: 1 – в точці A, де висота фестона максимальна; 2 – в точці B, де висота фестона мінімальна

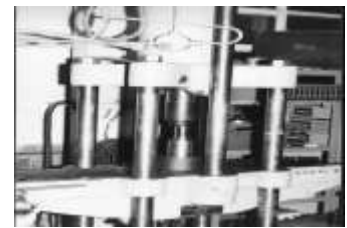


Рис. 14. Прес УИМ-50М та спеціальне оснащення для видавлювання

Експериментальні дослідження виконані на універсальній випробувальній машині УИМ-50 зусиллям 500 МН, на якій здійснювали деформацію заготовок в універсальному плунжерному штампі (рис. 14), або в окремих матрицях з пуансонами. При вивченні характеру деформації і силового режиму використовували технічний свинець. Це дозволило не пред'являти високих вимог до міцності експериментального оснащення і, таким чином, значно зменшити його вартість, провести необхідні для теоретичного аналізу експерименти.

При дослідженні характеру формозміни ставили задачу – побудувати експериментально функції швидкостей переміщень при тривимірній течії і порівняти їх з теоретичними. Далі досліджували характер формозміни заготовки з координатною сіткою, нанесеною безпосередньо на заготовку. Характер формозміни та силового режиму в умовах радіальної та тривимірної течії металу видавлювання квадратної заготовки круглим пуансоном показаний на рис. 15...16.

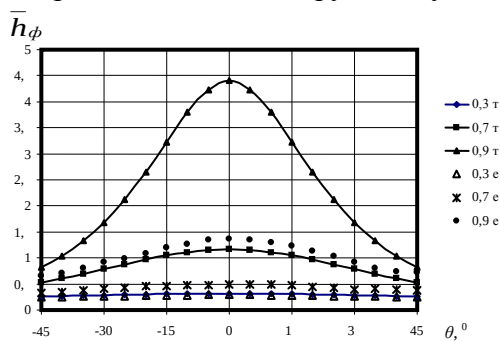


Рис.15. Зростання фестона $\bar{h}_\phi$ (теоретичне і експериментальне) залежно від θ для $\bar{r}_n=0,3\dots0,9$

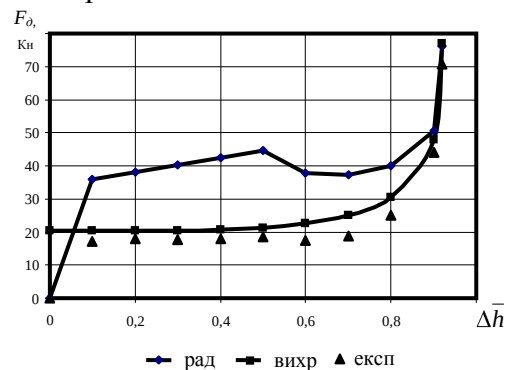


Рис. 16. Графік залежності теоретичного (лінії) та експериментального (точки) зусилля деформації F_δ від відносного питомого ходу пуансона $\Delta \bar{h}$: $\bar{r}_n = 0,5$; $\mu = 0,08$

Рис. 16 свідчить, що для тривимірної течії спочатку потрібне більше зусилля (приблизно до $\Delta h = 0,07$), а потім – менше. Саме через це й відбувається перехід від радіальної течії до тривимірної.

Досліджено формозміну та силовий режим видавлювання з квадратної заготовки круглої деталі типу стакану з тонкою стінкою. Як видно з рисунків 17 і 18, характер теоретичної залежності відповідає характеру експериментальної.

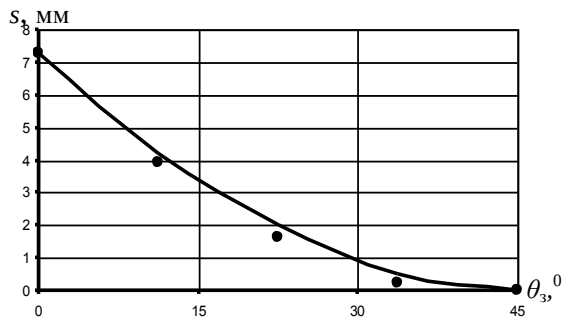


Рис. 17. Графіки залежності міри незаповнення матриці s від кута заповнення θ_3

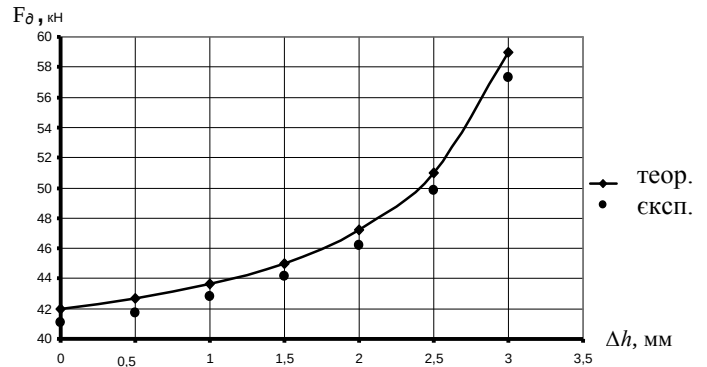


Рис. 18. Силовий режим деформації квадратної заготовки в круглій матриці при $h_0 = 6,5 \text{ мм}$ ($h_0/D = 0,13$); матеріал – свинець

Це свідчить про адекватність математичного опису та апробацію теоретичних розрахунків. Розбіжність чисельних значень силового режиму видавлювання, отриманих в ході експериментів, не перевищує 8 – 10%.

У **п'ятому розділі** на підставі проведених досліджень наведені рекомендації з удосконалення технології та конструкцій штампів.

При видавлюванні деталей із змінною по периметру товщиною стінки технологічний процес можна удосконалити наступними шляхами:

- розрахувати за запропонованою методикою, яка описана у другому розділі, висоту фес-тону і закласти цей об'єм у розрахунок заготовки;

- при видавлюванні деталей з кольорових металів (коли зусилля деформації невелике) можна застосувати два способи: 1) видавлювання з протитиском на початковій стадії деформування деталі (штамп для цієї мети описаний у дисертаційній роботі); 2) видавлювання заготовки в замкнутій порожнині рухомої матриці (у відповідності з АС СРСР 1156792);

- при видавлюванні сталевих деталей, а також деталей з міцних матеріалів, можна використовувати пуансони із змінною висотою калібрувального паска (як це описано у дисертаційній роботі).

При видавлюванні деталей типу тонкостінних стаканів з алюмінієвих або магнієвих сплавів технологічний процес можна зробити більш ефективнішим, використовуючи не круглу заготовку, а квадратну. Як показано у дисертаційній роботі, за рахунок тривимірної течії металу на першій стадії квадратна заготовка перетворюється на круглу, після чого можливе видавлювання тонкостінного стакану. Тут потрібно точно розрахувати, яке зусилля потрібне для першої стадії (чисто радіальної течії для видавлювання тонкостінного стакану). В дисертації показано, як цю задачу можна вирішити для конкретної деталі.

Запропоновані економічні технологічні процеси видавлювання різноманітних деталей, зокрема тюбиків для косметичної та харчової промисловості. У порівнянні з існуючою технологією цей процес дає можливість зменшити на 31% норму витрати коштовного харчового алюмінію.

У **додатках** наведено акти впровадження на ДП "Завод ім. В.О. Малишева", у навчальний процес, а також у практику наукових досліджень в НТУ «ХП».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу обґрунтування розрахунків процесу тривимірної течії металу на прикладі видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною

стілки на основі математичного моделювання процесу холодного видавлювання металів. Основні наукові та практичні результати виконаних досліджень полягають у наступному:

1. Відомі методи аналізу процесів радіальної течії металу при видавлюванні деталей із змінною по периметру товщиною стінки характеризуються значними спрощеннями, які не дозволяють проаналізувати поля швидкостей і отримати адекватні рішення з формозміни деталей цього класу. Тому в роботі виконано аналіз деформованого стану в процесах видавлювання деталей в умовах радіальної та тривимірної течії металу.

2. Видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки характеризується складною течією металу. На прикладі видавлювання квадратної деталі з циліндричним отвором показана можливість використання методу теоретичного аналізу процесу деформації при явно вираженій невісесиметричній течії металу. Розроблені математичні моделі трьох процесів: видавлювання в умовах радіальної течії металу; видавлювання в умовах тривимірної течії металу; виготовлення круглої заготовки в умовах тривимірної течії металу. Це дало підстави для розроблення науково обґрунтованих рекомендацій з удосконалення процесів видавлювання широкого класу деталей із змінною по периметру товщиною стінки та конструкцій штампів.

3. Теоретичний аналіз процесу видавлювання за наявності декількох варіюваних параметрів представляє значні труднощі обчислювання для створення програмних продуктів розрахунків формозміни і силового режиму, тому необхідно використовувати спеціальні пакети програм типу MathCAD. Теоретичний аналіз процесу видавлювання по запропонованій методиці дозволяє з достатньою точністю визначити поле швидкостей процесу, формозміну, а також зусилля деформації при різних геометричних параметрах інструменту.

4. Експериментальні дослідження формозміни і енергосилових параметрів процесу в умовах тривимірної течії металу показали адекватність математичних моделей і обґрунтованість уявлень про тривимірну течію металу та рекомендацій щодо удосконалення технологій та конструкцій штампів. Розбіжність чисельних значень силового режиму видавлювання, отриманих в ході експериментів, не перевищує 8 – 10%.

5. Розроблені рекомендації дозволяють удосконалити технології виготовлення широкого класу деталей із змінною по периметру товщиною стінки, а також конструювання штампів на базі науково обґрунтованих математичних моделей процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу.

6. Запропоновані в дисертації алгоритми і комп'ютерні програми, що забезпечують визначення формозміни (висоти фестонов), потужності, роботи та зусилля деформації, які необхідні для формування заготовок і деталей при невісесиметричній (тривимірній) течії металу, впроваджені в практику розробки технологічних процесів і конструювання штампів ДП "Завод ім. В.О. Малишева", а також у дослідницький та навчальний процес НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кротенко Г.А. Теоретический анализ комбинированного выдавливания ступенчатым пуансоном / В.А.Евстратов, О.А.Чегринец, С.Л. Гогайзель, Г.А. Кротенко // Машиностроение. Москва: Известия вузов. – 1988. – №4. – С. 110-113.

Здобувачем проведено перевірка поля швидкості течії металу в областях деформування деталі зі складною порожниною в умовах вісесиметричної течії металу.

2. Кротенко Г.А. Анализ процесса комбинированного выдавливания ступенчатым пуансоном / О.А. Чегринец, Г.И. Кириллов, С.Л. Гогайзель, Г.А.Кротенко // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: «Выща школа». – 1988. – №261. Вып. 9 – С. 7-9.

Здобувачем до розробки адекватної математичної моделі процесів видавлювання в умовах вісесиметричної течії металу перевірено поле швидкості течії металу.

3. Кротенко Г.А. Математическое моделирование формоизменения и силового режима выдавливания в условиях вихревого течения. Часть 1. Анализ образования фестонов / В.А.Евстратов, Г.А.Кротенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2002. – С. 245-249.

Здобувачем зроблено аналіз утворювання фєстону в процесі видавлювання деталі в умовах вихрової течії металу.

4. Кротенко Г.А. Нові підходи до аналізу деформованого стану в процесах тривимірної деформації/ В.О. Євстратов, В.М. Левченко, Я.В. Кутецький, Г.А. Кротенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: збірник наукових праць. – Краматорськ-Слов'янськ: ДДМА. – 2003. – С. 234- 236.

Здобувачем запропонована адаптація узагальненого параметричного підходу для опису деформованого стану в процесах тривимірної деформації.

5. Кротенко Г.А. Совершенствование конструкций штампов для выдавливания сложных деталей при трехмерном течении металла / Г.А.Кротенко // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 3. – С. 94-100.

6. Кротенко Г.А. Малоотходный способ выдавливания тонкостенных цилиндрических деталей из квадратных заготовок / В.А. Евстратов, Г.А.Кротенко, В.Н. Левченко // Обработка материалов давлением: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2006. – С.351-355

Здобувач побудувала математичну модель та провела числові розрахунки, узагальнила і розвинула метод розрахунково-експериментального дослідження для визначення параметрів видавлювання тонкостінних стаканів.

7. Кротенко Г.А. Экспериментальное исследование выдавливания в условиях вихревого течения металла / Г.А. Кротенко // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 33. – С. 53-62.

8. Кротенко Г.А. Новые подходы к математическому моделированию процессов выдавливания в условиях вихревого течения / В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко, В.Н. Левченко // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2009. – № 31. – С. 100-109.

Здобувачем вперше запропоновано загальний метод, розроблено та реалізовано алгоритми проведення розрахунків процесу видавлювання складних деталей в умовах вихрової течії.

9. Кротенко Г.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.

Здобувачем проведено аналіз та узагальнення результатів досліджень процесу видавлювання деталі в умовах вихрової течії металу.

10. Кротенко Г.А. Анализ процессов выдавливания с использованием модели вихревого течения / В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко, В.Н. Левченко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва: ООО “КШП ОМД”, №4, 2010. – С. 3-10.

Здобувачем запропоновано узагальнений метод теоретичного аналізу процесу деформування складних деталей, що характеризуються вихровим характером течії металу. Розроблено поле швидкостей. Також описано процес утворення фєстона.

11. Кротенко Г.А. Новые подходы к разработке математических моделей процессов выдавливания деталей типа коробок / В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко // “Информационные технологии, наука, техника, технология, образование, здоровье”. Тезисы докл. междунар. н.-техн. конф. – Харьков-Мишкольц: ХГПУ, МУ, 1995. – С. 141.

Здобувачем проведено аналіз теоретичних методів та розробок математичних моделей розрахунків процесів видавлювання деталей типа коробок.

12. Кротенко Г.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.

Здобувачем запропоновано енергетичний метод досліджень до розробки адекватної математичної моделі процесів штампування в умовах невісесиметричної течії металу.

13. Кротенко Г.А. Математическое моделирование процесса выдавливания и конструкции штампов/ В. Евстратов, Г. Кротенко // Оборудование и инструмент для профессионалов. – Харьков: ООО “ЦентрИнформ”. – 2002. – №10(33). –С. 26-29.

Здобувачем запропоновано метод досліджень процесу формоутворення корпусної деталі, конструкція штамп з протитиском до видавлювання цієї.

14. Кротенко Г.А. Математическое моделирование формоизменения и силового режима выдавливания в условиях радиального и вихревого трения / В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко, В.Н. Левченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 11^й Междунар. н.-техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2005. – С. 184-191.

Запропонована нова узагальнена технологія моделювання процесів та синтезу параметрів видавлювання деталі із змінною по периметру товщиною стінки за схемою радіальної та вихрової течії металу; проведено порівняльний аналіз поля швидкості.

15. Кротенко Г.А. Математическое моделирование формоизменения и силового режима выдавливания в условиях трехмерного течения / В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко, В.Н. Левченко // Сборник тезисов междунар. н.-техн. конф. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет (БГТУ) «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2005 – С. 76-80.

Здобувачем показана можливість теоретичного аналізу процесу видавлювання квадратної деталі з циліндричним отвором при явно вираженій невісесиметричній течії металу.

АНОТАЦІЇ

Кротенко Г.А. Аналіз процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском, – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2011.

Дисертація присвячена аналізу процесу видавлювання в умовах тривимірної течії металу. Вперше показано, що процес видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки характеризується специфічною течією металу, яку в роботі умовно назвали «вихровою течією». До теперішнього часу ця особливість не враховувалася в теоретичних дослідженнях. Тому моделі процесів видавлювання деталей із змінною по периметру товщиною стінки неадекватно описували процес деформування. З метою дослідження даного процесу в роботі створено математичну модель, що відрізняється новим підходом: при описі поля швидкостей враховуються всі три компоненти $v_r \neq 0$; $v_\theta \neq 0$; $v_z \neq 0$. Це ускладнило розрахунки, але дозволило створити моделі, які адекватно описують процес. Вперше доведено, що формування стінки деталі із змінною по периметру товщиною стінки протікає у дві стадії: на початковій формується фестон (бо відбувається радіальна течія, коли $v_\theta = 0$); на заключній – висота стінки не змінюється (бо відбувається тривимірна течія, коли $v_\theta \neq 0$). Також вперше розроблена методика розрахунку видавлювання з квадратної заготовки деталі типу тонкостінних стаканів. Для цих процесів на базі варіаційного методу вперше розроблені числові моделі, які необхідні для проектування технологічних процесів та штамів.

Результати, що отримані в ході експериментальних досліджень підтвердили адекватність математичних моделей процесу видавлювання деталей в умовах тривимірної течії. Порівняння чисельних розрахунків з даними експериментальних досліджень підтвердили точність побудованих моделей та отриманих результатів. Похибка не перевищує 8 – 10%.

На основі проведених досліджень розроблено технології, які дозволяють отримати корпус і тонкостінний стакан видавлюванням. Застосування даної технології замість традиційної дозволило збільшити коефіцієнт використання металу на 31% і тим самим значно знизити їхню собівартість. Дані рекомендації щодо удосконалення технологічних процесів видавлювання та конструювання штамів.

Ключові слова: штампове оснащення, формозмінення, видавлювання, варіаційний метод, поле швидкості, тривимірна течія металу, фестони.

Кротенко Г.А. Анализ процесса выдавливания в условиях трехмерного течения металла. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011.

Диссертация посвящена анализу процесса выдавливания в условиях трехмерного течения металла. Впервые показано, что процесс выдавливания деталей с переменной по периметру

толщиной стенки характеризуется специфическим трехмерным течением металла, которое в работе условно названо «вихревым течением». До настоящего времени эта особенность не учитывалась в теоретических исследованиях. Поэтому модели процессов выдавливания деталей с переменной по периметру толщиной стенки неадекватно описывали процесс деформирования.

С целью исследования данного процесса в работе создана математическая модель, отличающаяся новым подходом: при описании поля скоростей учитываются все три компоненты скорости течения металла: $v_r \neq 0$; $v_\theta \neq 0$; $v_z \neq 0$. Это значительно усложнило математическое описание, но позволило создать новые модели, которые адекватно описывают процесс. Для создания новых моделей использовано условие постоянства объема для трехмерного течения: $\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r}(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r) = 0$. В это условие вместо двух неизвестных функций, которые описывают осесимметричную деформацию (v_r и v_z), входят три (v_r , v_z , v_θ). Поэтому традиционные подходы, используемые при анализе радиального течения, не могут быть использованы. В работе для создания математических моделей использован вариационный метод: функция v_θ описывается подходящей функцией с пятью варьируемыми параметрами. Такой подход обусловил значительные вычислительные трудности, но дал возможность построить адекватные математические модели процесса выдавливания в условиях трехмерного течения металла. Вычислительные трудности преодолены использованием мощных ЭВМ и современных пакетов прикладных программ. Для отыскания значений варьируемых параметров использован метод Монте-Карло и пакет MathCAD.

В работе впервые доказано, что при формировании стенки детали с переменной по периметру толщиной процесс протекает в две стадии: 1) на начальной формируется фестон (так как происходит радиальное течение, когда $v_\theta = 0$); 2) на второй – высота стенки не меняется (так как происходит трехмерное течение, когда $v_\theta \neq 0$).

Для этого процесса на базе вариационного метода впервые создана математическая модель, разработана методика расчета формоизменения и силового режима выдавливания, созданы алгоритмы и программы, необходимые для проектирования технологических процессов и штампов выдавливания деталей с переменной по периметру толщиной стенки. Даны рекомендации по совершенствованию технологических процессов выдавливания и конструированию штампов. Также впервые на базе вариационного метода создана математическая модель процесса выдавливания, разработана методика расчета формоизменения и силового режима изготовления из квадратной заготовки деталей типа тонкостенных стаканов, созданы компьютерные программы, необходимые для проектирования технологических процессов и конструкций штампов.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры ОМД НТУ «ХПИ». Результаты полученные в ходе экспериментальных исследований подтвердили адекватность математических моделей процесса выдавливания деталей в условиях трехмерного течения. Сравнение численных расчетов с данными экспериментальных исследований силового режима выдавливания подтвердили точность построенных моделей и полученных результатов. Погрешность не превышает 8 – 10%.

На основе проведенных исследований разработаны технологии, которые позволяют изготавливать разнообразные детали с переменной толщиной стенки, а также тонкостенные стаканы выдавливанием из квадратной заготовки. Применение данной технологии взамен традиционной позволило повысить качество деталей, увеличить коэффициент использования металла на 31% и тем самым значительно снизить их себестоимость.

Ключевые слова: штамповая оснастка, формоизменение, выдавливание, вариационный метод, поле скоростей, трехмерное течение металла, фестон.

Krotenko G.A. Analysis of the extrusion process in a three-dimensional flow of metal. – Manuscript.

Thesis for the academic degree of candidate of engineering science in a speciality 05.03.05 – processes and machines of mechanical working / - National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv, 2011.

The thesis analyzes the process of extrusion in a three-dimensional flow of metal. It was shown that the process of extrusion parts with variable wall thickness along the perimeter characterized by a specific three-dimensional flow of metal. So far, this feature is not taken into account in previous theoretical studies. In order to study this process in a mathematical model, wherein a new approach: the description of the velocity field takes into account all three components of velocity $v_r \neq 0$; $v_\theta \neq 0$; $v_z \neq 0$. This gives the possibility to determine the intensity of deformation $\varepsilon_i = f(r, z, \theta)$, deformation, extrusion force F_δ , and on this base to design high-performance die extrusion parts without defects.

In designing the die sets this feature of the process is taken into account when forming a wall parts with variable thickness along the perimeter. We proved that the process of deformation occurs in the two stages: 1) initial – scallops formed (when we have only radial flow, i.e. $v_\theta = 0$), 2) second – the height of the wall does not change (when we have a three-dimensional flow of metal, i.e. $v_\theta \neq 0$). Based on the variational method was first developed a method of calculation of forming and power mode extrusion of the square billet parts such as “thin-walled cans”, a mathematical model of the process, the algorithms and computer programs we need for die design and manufacturing processes. Based on the developed techniques this model allows us to obtain thin-walled cans extrusion. Application of this technology instead of traditional allowed to raise quality, increase utilization factor of the metal at 31% and thereby significantly reduce their costs. The results obtained in experimental studies have confirmed the adequacy of mathematical models of the extrusion of parts in a three-dimensional flow.

Comparison of numerical calculations with experimental investigations confirmed the accuracy of these models and results. The error does not exceed 8 – 10%.

Key words: tooling, forming, extrusion, variational method, velocity field, three-dimensional flow of metal, scallops.

Кротенко Галина Анатоліївна

**АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВИДАВЛЮВАННЯ
В УМОВАХ ТРИВИМІРНОЇ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ**

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
доц. к.т.н, Зарубіна А.О.

Підп. до друку 30.03.2011 р. Формат 60х90/16. Папір офісний.
Друк – ризографічний. Ум. друк. арк. 0,9. Гарнітура Таймс.
Наклад 100 прим. Зам. № .

Надруковано у СПД ФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
