

Знаходження та аналіз енергосилових параметрів процесу утворення фланця орбітальним штампуванням обкочуванням

С.П. Гожій¹ • А.В. Кліско¹ • В.А. Мироненко¹

Received: 8 August 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. Характерною особливістю деталей, що розглядаються в статті, є збільшений діаметр фланця. На кафедрі технології виробництва літальних апаратів науково-навчального механіко-машинобудівного інститут Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського розроблений оригінальний технологічний процес виготовлення виробів з розвинутою фланцевою частиною з використанням позитивних ефектів прогресивного методу штампування обкочуванням. Метод має енергосилові переваги перед традиційними методами виготовлення деталей з відносно тонкими елементами конструкції. Осередок застосування таких технологій все більше розширюється але основні технологічні розрахунки параметрів процесу запроваджені ще недостатньо широко у виробничу практику. Запропонована послідовність технологічних розрахунків та основних параметрів спеціалізованих установок для штампування обкочуванням.

Ключові слова: орбітальне штампування, штампування обкочуванням, енергосилові параметри, технологічний процес, метод балансу робіт, моделювання, метод скінчених елементів.

Вступ

Характерною особливістю деталей, що розглядаються, є збільшений діаметр фланця в порівнянні з стрижнем. За існуючої технології виробничого виготовлення таких виробів є застосування горизонтально-ковальської машини та обробка в гарячому стані.

Для висадки фланця з розмірами, які відносяться до розвинутих, потрібна потужна і вартісна горизонтально-ковальська машина, яка не виготовляється вітчизняним виробниками.

На кафедрі технології виробництва літальних апаратів КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблений оригінальний технологічний процес виготовлення виробів з розвинутою фланцевою частиною штампуванням з обкочуванням фланця з використанням позитивних ефектів прогресивного методу штампування обкочуванням (orbital forging, rotary forging), який має енергоси-

лові переваги перед традиційними методами отримання вісесиметричних заготовок з відносно тонкими елементами конструкції, а іноді і готових виробів [1–4]. Осередок застосування цієї технології все більше розширюється.

Тим не менш основні технологічні розрахунки параметрів процесу досліджені і запроваджені недостатні для широкої виробничої практики.

Для розробки нового технологічного процесу і спеціальної установки на кафедрі була вирішена задача розроблення методу визначення енергосилових параметрів штампування обкочуванням на рівні виробничого застосування.

Вирішення задачі проводилось двома напрямками: – традиційним аналітичним методом із застосуванням класичних методів визначення технологічних і конструкторських параметрів процесу і обладнання; – моделюванням процесу методом скінчених елементів. На кінцевому етапі проводилось порівняння результатів розрахунків.

По першому напрямку, враховуючи чисто інженерний характер розрахунків при аналізі параметрів штампування обкочуванням для визначення енергосило-

✉ А.В. Кліско
andrey.klisko@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

вих параметрів, найбільш доцільним і широко застосованим для процесів подібних до прокатування є енергетичний метод (балансу робіт) [5].

При цьому дотримуємось допущення про однорідність пластичного деформування при обробці обкочуванням тонких елементів виробу [6] і постійності значення коефіцієнта тертя на контактній поверхні [7].

На підставі підходу розподілу робіт складемо рівняння баланс робіт для останнього циклу сталого режиму обробки фланця:

$$A_{\partial} = A_{oc} + A_{об} \quad (1)$$

де $A_{\partial}, A_{oc}, A_{об}$ – сумарна робота деформацій, робота осаджування (висаджування) деталі і обкатування фланця, відповідно.

Роботу деформації визначаємо як:

$$A = V \cdot \rho_{сер}$$

де V – зміщений об'єм; $\rho_{сер}$ – середні питомі зусилля на контактній поверхні.

При обкочуванні конічним інструментом з одночасним його осьовим переміщенням з частотою обкочування n [об/с], і осьовою швидкістю ϑ [мм/с] циклова висотна деформація заготовки h складає:

$$h = \frac{\vartheta}{n}$$

Так, як h в порівнянні з початковою висотою заготовки H незрівнянно мале, приблизний цикловий зміщений об'єм наближено може бути визначений як:

$$V_c = V \cdot \varepsilon = \frac{V}{H} \cdot \frac{\vartheta}{n} \approx \frac{V}{H_{\partial}} \cdot \frac{\vartheta}{n} \approx F_{\partial} \cdot \frac{\vartheta}{n}, \quad (2)$$

де $\varepsilon = \frac{h}{H}$ – циклова степінь висотної деформації;

V_c – представляє собою суму зміщених об'ємів, що досягнуті за рахунок осаджування і обкочуванням; $H_{\partial}, F_{\partial}$ – висота та площа перерізу деталі на закінчення обробки.

Визначимо об'єм, зміщений за рахунок осаджування. При цьому враховуємо, що циклова степінь деформації незначна в порівнянні з загальною. Будемо з деякими наближеннями рахувати, що об'єм металу, який витіснений конічним інструментом при переміщенні на величину h , є шуканим зміщеним об'ємом. Рівняння поверхні інструменту отримаємо з канонічного рівняння прямого кругового конусу (рис. 1) поворотом системи координат на кут φ навколо осі OX_1 .

$$\frac{x_1^2 - y_1^2}{a^2} - \frac{z_1^2}{c^2} = 0$$

Після перетворень отримаємо шукане рівняння в новій системі координат $OXYZ$.

$$z^2 + zy \cdot \operatorname{tg} 2\varphi - \frac{1}{2} x^2 \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} 2\varphi = 0 \quad (3)$$

Вершина конічного інструменту лежить на початку координат і твірна конусу співпадає з віссю OY .

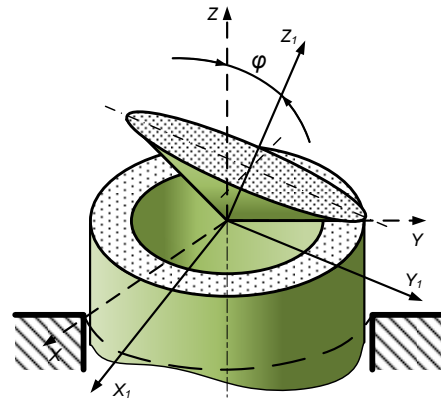


Рис. 1. Схема переходу з системи $OX_1Y_1Z_1$ в нову систему координат $OXYZ$ при обкочуванні конусним інструментом фланцевої частини (де φ – кут нахилу осі конічного інструменту)

Зміщений об'єм може бути знайдений як об'єм тіла обертання, що обмежений конічною поверхнею:

$$x^2 + y^2 = R_1^2, ix^2 + y^2 = R_2^2;$$

де R_1, R_2 – радіуси кільцевої частини фланця і площини $Z = h$:

$$h^2 + hy \cdot \operatorname{tg} 2\varphi - \frac{1}{2} x^2 \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} 2\varphi = 0 \quad (4)$$

Вирішуючи разом (4) і рівняння циліндричної поверхні кільцевої частини фланця заготовки $x^2 + y^2 = R_1^2$ і $x^2 + y^2 = R_2^2$ можна визначити Y_{c1} і Y_{c2} (рис. 2):

$$Y_{c1} \approx R_1 - \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi}; Y_{c2} \approx R_2 - \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (5)$$

Будемо вирішувати задачу шляхом розбивки об'єму на три складові (рис. 3.):

$$V_{oc} = V_1 - V_2 + V_3, \quad (6)$$

де V_1 – об'єм осередку вздовж внутрішнього зміщеного шару; V_2 – центральний об'єм; V_3 – периферійний шар об'єму.

Тоді
$$V_1 = 2 \iiint_V v \, dx \, dy \, dz = 2 \iint_{\sigma_i} dz \, dy \int_0^{X_k} dx$$

де X_k -вираховується з рівняння конічної поверхні (4)

$$X_k = \sqrt{\frac{2}{\operatorname{tg} \varphi}} \cdot z^{\frac{1}{2}} \left(y + \frac{z}{\operatorname{tg} 2\varphi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

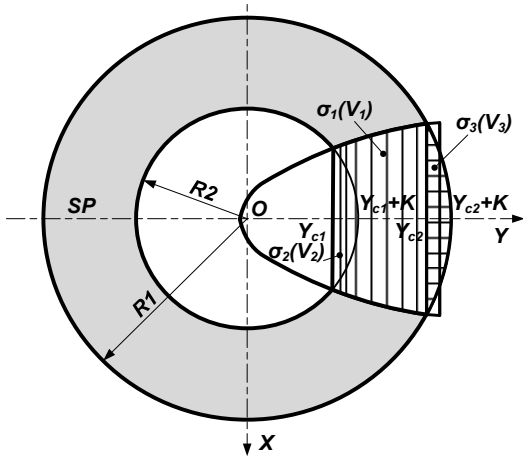


Рис. 2. Розбивка об'єму пластичної деформації фланця на три складові

Після підстановки меж інтегрування:

$$V_1 = 2 \int_0^h dz \int_{Y_{c2}}^{Y_{c1}} dy \int_0^{X_k} dx$$

Кінцевий результат:

$$V_1 = \frac{4}{9} \cdot \sqrt{\frac{2}{\operatorname{tg} 2\varphi}} \left\{ h^2 \left[\left(\frac{h}{\operatorname{tg} 2\varphi} + Y_{c2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h}{\operatorname{tg} 2\varphi} + Y_{c1} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + \frac{1}{2} (Y_{c1} I_1 - Y_{c2} I_2) \right\}, \quad (8)$$

де

$$I_1 = 2Y_{c1}^2 \left[\frac{t_1}{4 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} - t_1^2 \right)^2} - \frac{t_1}{8 \operatorname{tg} 2\varphi \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} - t_1^2 \right)} - \frac{1}{16 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} \right)^{\frac{3}{2}}} \right] \times \ln \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} + t_1}}{\sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} - t_1}} \right]; \quad (9)$$

$$I_2 = 2Y_{c2}^2 \left[\frac{t_2}{4 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} - t_2^2 \right)^2} - \frac{t_2}{8 \operatorname{tg} 2\varphi \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} - t_2^2 \right)} - \frac{1}{16 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} \right)^{\frac{3}{2}}} \right] \times \ln \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} + t_2}}{\sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} - t_2}} \right].$$

Складові зміщеного об'єму V_{oc} , об'єми V_2 і V_3 представляють вирази:

$$V_2 = R_1^2 \cdot h \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) - Y_{c1}^2 \cdot h \cdot \operatorname{ctg} \alpha_1 + \frac{\operatorname{tg} 2\varphi}{3} \left[R_1^3 (\cos \alpha_1 - \frac{\pi}{2} + \alpha_1) + Y_{c1}^3 \left(\frac{\cos \alpha_1}{2 \sin^2 \alpha_1} + \frac{1}{2} \ln \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}} - \operatorname{ctg} \alpha_1 \right) \right]; \quad (10)$$

$$V_3 = R_2^2 \cdot h \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) - Y_{c2}^2 \cdot h \cdot \operatorname{ctg} \alpha_2 + \frac{\operatorname{tg} 2\varphi}{3} \left[R_2^3 (\cos \alpha_2 - \frac{\pi}{2} + \alpha_2) + Y_{c2}^3 \left(\frac{\cos \alpha_2}{2 \sin^2 \alpha_2} + \frac{1}{2} \ln \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2}} - \operatorname{ctg} \alpha_2 \right) \right], \quad (11)$$

де $\alpha_1 = a 2 \sin \frac{Y_{c1}}{R_1}$

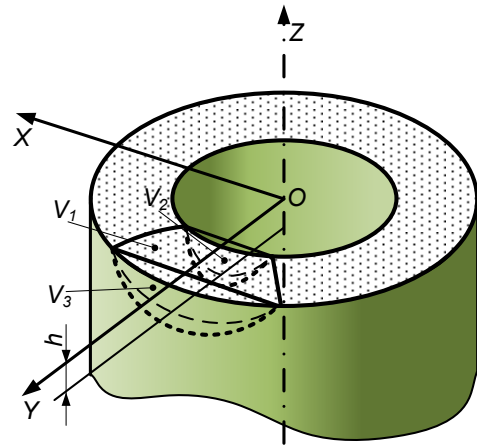


Рис. 3. Схема розбивки осередку на три складові (де V_1 – об'єм осередку вздовж внутрішнього зміщеного шару; V_2 – центральний об'єм; V_3 – периферійний шар об'єму; R_1, R_2 – зовнішній і внутрішній розміри фланці; SP – серединна площина осередку)

Введемо припущення прийнятні для інженерних розрахунків і маємо.

$$V_{oc} = \frac{4}{9} \sqrt{\frac{2}{\operatorname{tg} 2\varphi}} \left\{ h^3 \left[\left(R_2 + \frac{h}{\operatorname{tg} 2\varphi} - \frac{h}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(R_1 + \frac{h}{\operatorname{tg} 2\varphi} - \frac{h}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} \left[I_2 \left(R_2 - \frac{h}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right) - I_1 \left(R_1 - \frac{h}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right) \right] \right] \right\}. \quad (12)$$

Тут I_1, I_2 ті ж величини, що в виразах (9), але замість Y_{c1} і Y_{c2} підставляємо $R_1 - \frac{h}{3 \operatorname{tg} \varphi}$ і $R_2 - \frac{h}{3 \operatorname{tg} \varphi}$, відповідно.

Визначення осьового зусилля становиться можливим, використовуючи знайдені зміщені об'єми осаджування і величину циклового осьового переміщення.

В сталому режимі обкочування зусилля постійні:

$$P = \frac{A_{oc}}{h} = \frac{\rho_{cep} \cdot V_{oc}}{h}. \quad (13)$$

Підставивши в даний вираз значення V_{oc} із (12), отримуємо:

$$P = \frac{4}{9} \rho_{cep} \sqrt{\frac{2}{tg\varphi}} \left\{ h^{\frac{1}{2}} \left[\left(R_2 + \frac{h}{tg2\varphi} - \frac{h}{3tg\varphi} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(R_1 + \frac{h}{tg2\varphi} - \frac{h}{3tg\varphi} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{2h} \left[I_2 \left(R_2 - \frac{h}{3tg\varphi} \right) - I_1 \left(R_1 - \frac{h}{3tg\varphi} \right) \right] \right] \right\}. \quad (14)$$

Крутний момент, що надається конічному інструменту, визначається із співвідношення:

$$M_{кр} = \frac{A_{o\delta}}{2\pi} = \frac{\rho_{cep}}{2\pi} \cdot V_{o\delta} \quad (15)$$

Об'єм, зміщений обкаткою, визначається рівністю сумарного циклового зміщеного об'єму і об'єму зміщеного осадкою.

$$V_{o\delta} = V_c - V_{oc} = \pi h (R_2^2 - R_1^2) - V_{oc} \quad (16)$$

Підставивши знайдені значення $V_{o\delta}$ і V_{oc} отримуємо:

$$M_{кр} = \frac{\rho_{cep}}{2\pi} \left\{ \pi h (R_2^2 - R_1^2) - \frac{4}{9} \rho_{cep} \sqrt{\frac{2}{tg\varphi}} \left[h^{\frac{3}{2}} \left(R_2 + \frac{h}{tg2\varphi} - \frac{h}{3tg\varphi} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(R_1 + \frac{h}{tg2\varphi} - \frac{h}{3tg\varphi} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} \left[I_2 \left(R_2 - \frac{h}{3tg\varphi} \right) - I_1 \left(R_1 - \frac{h}{3tg\varphi} \right) \right] \right] \right\}. \quad (17)$$

Підставимо в (14) $V_{o\delta}$ із (16) і в отриманий вираз підставимо V_{oc} із (12).

Після перетворень маємо:

$$M_{кр} = \frac{h}{2} \left[\rho_{cep} (R_2^2 - R_1^2) - \frac{P}{\pi} \right], \quad (18)$$

або

$$M_{кр} = \frac{h \cdot \rho_{cep}}{2} \left[(R_2^2 - R_1^2) - \frac{F_k}{\pi} \right], \quad (19)$$

де F_k – площа контакту в установленому режимі обкочування.

Рівняння (19) можна записати у вигляді:

$$M_{кр} = \frac{h \cdot \rho_{cep}}{2} (F - F_k), \quad (20)$$

де F – площа перерізу заготовки, перпендикулярно напрямку осаджування.

$M_{кр}$ у виразі (20) має функціональну залежність $F_k = f(F)$. Коли λ визначений як ефективний коефіцієнт зменшення зусилля осаджування при наявності обкочування і дорівнюється $\lambda = \frac{P_{oc}}{P_{o\delta}}$, (20) зручно представити у вигляді:

$$M_{кр} = \frac{h \cdot P_{oc}}{P_{o\delta}} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda} \quad (21)$$

Тут $P_{oc} = P_{cep} \cdot F$, а P_{cep} визначено відомими виразами [5]:

$$P_{cep} = \sigma_s \left(1 + 1,1 \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{6} \frac{d}{H} \right) \quad (22)$$

Якщо ввести припущення, що $\lambda = \frac{A}{A_{oc}} = \frac{V_{o\delta}}{V_{oc}}$, де:

A_{oc} – робота звичайного осаджування плоскими боками заготовки в вигляді кільця з радіусами R_1 і R_2 на величину h .

Тоді:

$$\lambda = \frac{\pi h (R_2^2 - R_1^2)}{\frac{4}{9} \sqrt{\frac{2}{tg\varphi}} \left\{ \sqrt{\frac{\vartheta}{\pi}} \left[\left(R_2 + \frac{\vartheta}{tg2\varphi} - \frac{\vartheta}{3tg\varphi} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(R_1 + \frac{\vartheta}{tg2\varphi} - \frac{\vartheta}{3tg\varphi} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{9\pi(R_2^2 - R_1^2)}{2} \left[I_2 \left(R_2 - \frac{\vartheta}{3tg\varphi} \right) - I_1 \left(R_1 - \frac{\vartheta}{3tg\varphi} \right) \right] \right] \right\}} \rightarrow \quad (23)$$

Використовуючи (17)–(21), визначимо потужність двигуна приводу конічного інструменту:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n^*}{97400 \cdot \eta} = \frac{h \cdot p_{oc} \cdot n^* \cdot (\lambda - 1)}{1948 \cdot 10^2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \eta} = \frac{n \cdot p_{oc} \cdot n^* \cdot (\lambda - 1)}{61 \cdot 10^4 \cdot \lambda \cdot \eta} [кВт] \quad (24)$$

де η – коефіцієнт корисної дії передачі від двигуна до конічного інструменту.

Необхідно визначити, що коефіцієнт λ , який в літературних джерелах традиційно визначають як співвідношення $\lambda = F / F_k$, тут має більш глибоку фізичну

сутність і визначається, як співвідношення zdeформованих (змішених) об'ємів, а не площин.

Доводячи справедливність останнього наводимо приклади варіантів будови контактних осередків осаджування (висаджування) фланців на трубчастій заготовці на рис. 4, де надані основні варіанти розподілу на зони переважного напрямку деформацій в контактному осередку. Якщо вважати за оптимальне значення ($\lambda_{оп}$) десятикратний вигравш по зусиллю деформування при штампуванні обкочуванням, тобто десятикратне зменшення об'єму деформування $\lambda_{оп} = 10$, то в залежності від кінематичних параметрів процесу мають місце різні випадки будови осередків деформування під впливом занурення кінцевого інструменту на величину h , що відповідає куту $2\alpha \approx 36^\circ$. У випадку на (рис. 4, а), а має місце $\lambda < 10$, що відповідає куту $2\alpha \approx \pi/2$, а у випадку на (рис. 4, б) має місце $\lambda > \lambda_{оп}$, що відповідає куту $2\alpha \approx \pi/6$. Головним чинником при цьому є переважні напрями деформації в пластичному осередку, які визначаються не площинами, а об'ємами: - при $\lambda = \lambda_{оп}$ мають місце приблизно однакові радіальні і тангенціальні деформації; - при $\lambda < 10$ переважають радіальні деформації; - при $\lambda > \lambda_{оп}$ переважають тангенціальні деформації.

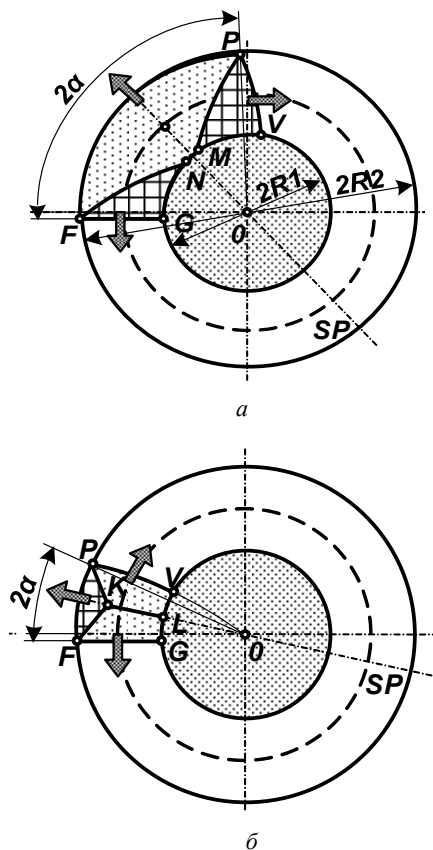


Рис. 4. Варіанти будови зони деформацій в контактному осередку при висаджуванні зовнішнього фланцю на трубчастій заготовці (де: а – $\lambda < \lambda_{оп}$; б – $\lambda > \lambda_{оп}$; SP – серединна площина осередку; 2α – кут виходу осередку на зовнішню циліндричну поверхню

Зокрема, для варіанту на (рис. 4, а), коли переважають радіальні деформації (як на зовні, так і в середину) вид формо зміненої трубчастої заготовки має вигляд показаний на (рис. 5, а). Для варіанту на (рис. 4, б), коли переважають тангенціальні деформації вигляд формо зміненої трубчастої заготовки може наближатись до форми як на (рис. 5, в), але не гарантує повну відповідність внутрішньої форми і розмірів. Тому для забезпечення геометрії внутрішньої порожнини застосовується внутрішня оправка (рис. 5, б), що гарантує отримання внутрішніх розмірів і зовнішність деталі по (рис. 5, в).

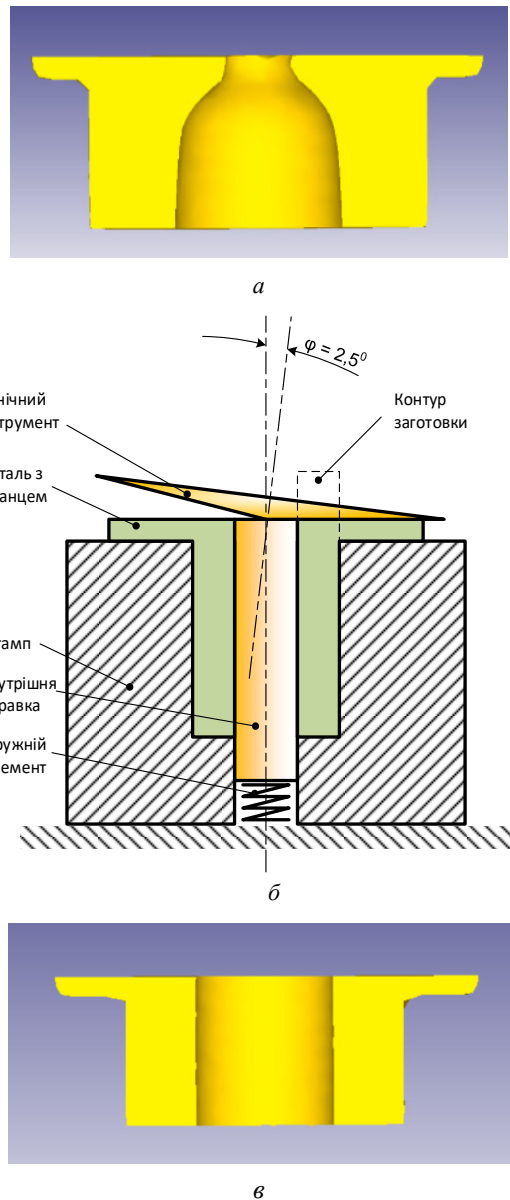


Рис. 5. Результати формозміни та схема процесу формування фланця орбітальним штампуванням обкочування (а – результати формозміни по схемі процесу на рис. 1; б – схема процесу формування фланця орбітальним штампуванням обкочування з внутрішньою оправкою; в – результати формозміни по схемі процесу з внутрішньою оправкою

Аналіз можливих локальних осередків при виготовленні деталей з фланцем дозволяє в залежності від конкретної осередку деформації скористатись різними технологічними схемами обробки.

Моделювання процесу формування фланця орбітальним штампуванням обкочуванням методом скінчених елементів проводилось за вхідних параметрів: – кількість елементів 25000 (рис. 6), що достатньо для перевірочних розрахунків; – матеріал виробу сталь DIN-C15; – деформування в холодному стані.

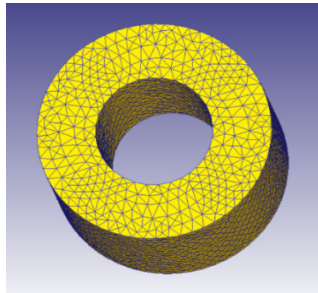


Рис. 6. Розбивка вхідної заготовки для формування фланця на скінчені елементи

Результати моделювання показують практично повну відповідність початкових стадій деформування, що показана на (рис. 7, а), (крок 20), до будови локального осередку деформації (рис. 2). При подальшому

деформуванні утворюється відмінність у набутті форми і розмірів по схемам формування фланця без оправки і з оправкою. Зокрема, порівняння розподілу інтенсивності напружень на (рис. 7) для різних стадій процесу (кроки 20 та 6000, рис. 7, а і рис. 7, б, відповідно) і по різних схемам (без внутрішньої оправки, рис. 7, а і рис. 7 та з оправкою, рис. 7, в і рис. 7, г, відповідно). Відмінності в чисельному значенні параметрів практично не спостерігається і знаходяться в межах: – для максимальних напружень до 7% на кроці 20; – в межах 9% для кроку 6000. Також для основою для розрахунку методу балансу робіт є визначення зміщених об'ємів, яке передбачає її наявність. Тому запропонований метод розрахунку енергосилових параметрів шляхом визначення складових балансу робіт із достатньою точністю може бути застосований при проектуванні подібних технологічних процесів.

Грунтуючись на викладеному, пропонується наступна послідовність технологічних розрахунків та основних параметрів спеціалізованих установок для штампування обкочуванням.

1. Задаємося рекомендованою величиною ϕ в межах 2° – 5° відповідно до відомих рекомендацій [1–3], що підтверджені експериментами, або застосуємо конструктивний параметр обладнання, у випадку, якщо він не заданий.

2. Попередньо задаючи значення λ в межах 20–50 [1–3] уточнюємо значення λ для конкретних розмірів

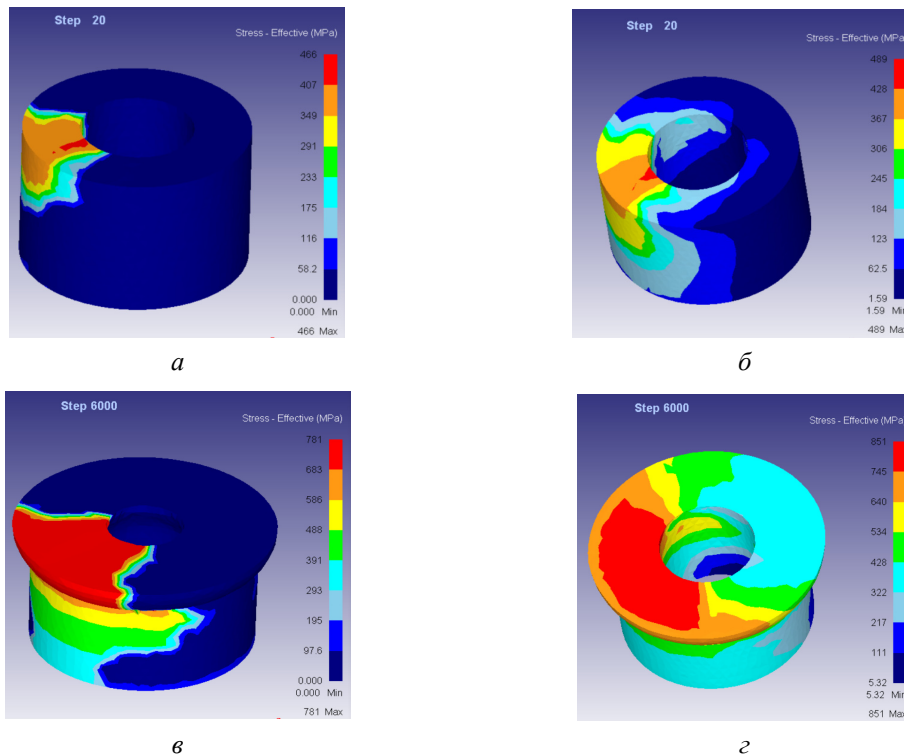


Рис. 7. Порівнянні результатів моделювання з розподілу інтенсивності напружень (де: а – розподіл інтенсивності напружень для кроку 20 схеми без оправки; б – розподіл інтенсивності напружень для кроку 20 схеми з оправкою; в – розподіл інтенсивності напружень для кроку 6000 схеми без оправки; г – розподіл інтенсивності напружень для кроку 6000 схеми з оправкою)

та кінематичних параметрів по (23). По заданих значеннях $\varphi, \lambda, \vartheta$ із (24) знаходимо величину N .

3. Потужність двигуна приводу N кіничного інструменту вираховується з врахуванням η , який розраховується в залежності від конкретної схеми трансмісії.

4. Маючи $\lambda, p_{об}$ визначається по виразу $p_{об} = \frac{p_{ос}}{\lambda}$.

5. По ϑ і N визначається h (рис. 2) і по (21) розраховується максимальний крутний момент $M_{кр}$.

Визначення інших параметрів відповідають методам розрахунку традиційних ковальсько-штампувальних машин. Оскільки розрахункові деформації у фланцевій частині мають високі ступені, але при локальних способах вони дещо вищі за вбудовані в програми розрахунків критерії пластичності слід дотримуватись рекомендацій [8, 9].

Висновки

Розроблена послідовність технологічних розрахунків та основних параметрів спеціалізованих установок для штампування обкочуванням.

References

- [1] X. Han and L. Hua, "Effect of Size of the Cylindrical Workpiece on the Cold Rotary-Forging Process", *Materials and Design*, Elsevier, Vol. 30, pp. 2802 – 2812, 2009. DOI: doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.021
- [2] L.T. Krivda and S.P. Gozhii, "Geometriya kontaktu pri plastichnomu deformuvanni obkochuvannyam", *KPI Sci. News*, No. 3(47), pp. 49–56, 2006.
- [3] O.S. Pshenishnyuk and L.T. Krivda, "Eksperimental'ne viznachennya serednikh pitomikh zuzil' pri osadzhuvanni obkochuvannyam", *Vestnik Kievskogo politehnicheskogo instituta. Mashinostroenie*, No. 22, pp. 77–81, 1985.
- [4] G. Samolyk, "Investigation of the Cold Orbital Forging Process of an AlMgSi Alloy Bevel Gear", *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, No. 213, pp. 1692–1702, 2013. DOI: doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.027
- [5] M.V. Storozhev and E.A. Popov, *Teoriya obrobbi metaliv tiskom*, Moscow: Mashinobuduvannya, 1977.
- [6] S.P. Gozhii, "Rozvitok modeli plastichnikh deformatsii pri osadzhuvanni tsilindrichnogo zrazka obkochuvannyam", *Vestnik Natsional'nogo tehniceskogo universiteta "Kievskij politehnicheskij institut"*. *Seriya mashinostroenie*, No. 52, pp. 359–365, 2008.
- [7] V.K. Smirnov, V.O. Shipov and K.I. Litvinov, *Deformations and susilla in calibers of a simple form*, Metalurgy, 1982.
- [8] V.A. Matviichuk and I.S. Aliev, *Udoskonalennya protsesiv lokal'noi rotatsiinoi obrobbi tiskom na pidstavi analizu deformivnosti metaliv*, Kramators'k: DDMA, 2009.
- [9] S.P. Gozhii, A.V. Klisko and A.G. Abiev, "Osoblivosti tsiklovogo navantazhennya pri shtampuvanni obkochuvannyam", *Vestnik Kievskogo politehnicheskogo instituta. Mashinostroenie*, No. 60, pp. 47–49, 2010.
- [10] A.C.P. Chou, P.C. Chou and H.C. Rogers, "Rotary Forging, Forming and Forging", *ASM Handbook formerly Metals Handbook*, 9th ed., ASM International, Vol. 14, pp. 176–179, 1988.

Finding and analyzing of the energy and force parameters of the flange formation process by orbital stamping by rolling

S. Godziy, A. Klisko, V. Myronenko

Abstract. A characteristic feature of the details considered in the article is the increased diameter of the flange. At the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanical and Mechanical Engineering Institute of the Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorskyi developed an original technological process for manufacturing products with a developed flange part using the positive effects of the progressive rolling stamping method. The method has energy-strength advantages over traditional methods of manufacturing parts with relatively thin structural elements. The center of application of such technologies is expanding more and more, but the basic technological calculations of process parameters have not yet been introduced widely enough into production practice. The proposed sequence of technological calculations and basic parameters of specialized installations for rolling stamping.

Keywords: orbital stamping, rolling stamping, energy-force parameters, technological process, work balance method, modeling, finite element method.