

## ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРОСТОГО ОБТЯГУВАННЯ

Пихтєєва І. В., к. т. н.,

Івженко О. В., к. т. н.,

Лубко Д. В., к. т. н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
ім. Д. Моторного*

Тел. (0619) 42-68-62

**Анотація** – сучасні тенденції розвитку різних галузей промисловості стимулюють розробку високоефективних і конкурентних видів техніки і технологій, які забезпечать жорсткі вимоги до якості та експлуатаційних властивостей виробів при економії матеріальних та енергетичних ресурсів, витрати на робочу силу, зниження собівартості виробництва, що є актуальними для машинобудування.

Типовими виробами авіаційної, машинобудівної індустрії є корпусні оболонки з листових заготовок (обшивки, паливні баки різних форм і розмірів, балони для зберігання газу, камер згоряння двигунів, і т.д.). До них пред'являються високі конструкторські вимоги, які визначають технологічні можливості виробництва деталей: геометрична точність, якість поверхні, механічні властивості, рівномірна товщина, надійність в експлуатації.

При цьому умовно тонкостінними будемо вважати ті деталі, у яких асиметричні деталі з усіченою звуженою формою з відносною  $D$  висотою  $H$ :  $0,5(- < 0,7$  і діаметр співвідношення –  $= 1,7 - = - 2,2., D d$

Мета технолога у тому, щоб спроектувати технологічний процес з мінімальною кількістю переходів, високим коефіцієнтом використання матеріалу, точними геометричними параметрами. Крім того, виготовлена деталь має відповідати вказаним експлуатаційним характеристикам. При досягненні цього результату важливо враховувати різновтовщинність отриманих деталей у листовій штамповці. Відомо, наприклад, що різновтовщинність багатократній витяжці дорівнює – 50-100%. Це одна з основних причин для зниження формоутворення на подальших операціях.

У подальшому будемо розглядати тонкостінні штамповки, зменшення коефіцієнта матеріалу, тому що не завжди отриманий характер зміни товщини, її величина на штампованих деталях відповідає необхідним характеристикам. Щоб уникнути цього вихідну товщину заготовки обирають завищену на певну величину різновтовшинності.

**Ключові слова** – теорії тонких оболонок, метод збурювання, математичні моделі, процес простого обтягування, алгоритм побудови, листова штамповка.

*Постановка проблеми.* Для деталей, що піддаються механічній обробці, збільшується трудомісткість виготовлення та витрати матеріалу за рахунок збільшення кількості металу, яка йде у стружку.

Таким чином, з технічної та економічної точки зору дуже важливо розробляти технологічний процес таким чином, щоб він був спрямований на зміну товщини заготовки

Із аналізу науково-технічної літератури робимо висновок, що один із раціональних процесів виготовлення тонкостінних осесиметричних деталей усіченої звуженої форми є процес формовки із конічних заготовок.

З використанням методу обурення вирішується задача по визначенню технологічних параметрів процесу простого обтягування.

*Методика.* Аналіз більшості операцій листового штампування призводить до контактних задач теорії оболонок. Коректне рішення таких задач вже в пружній області принципово неможливо без урахування зсувних напружень і деформацій [1]. І хоча через малу частку ними іноді нехтують, проте не будь-яку малу величину можна відкинути, не спотворюючи сенсу завдання. Для дослідження впливу таких величин розроблений метод збурювання [2-3], який і використаний для дослідження математичної моделі простого обтягування.

Суть цього методу полягає в наступному: всі вхідні величини розкладаються в асимптотичні ряди в малому параметру  $\delta > 0$  (тут  $\delta = \frac{1}{R}$  відносна кривизна), наприклад:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=0}^{\infty} \sigma_{ij}^{[k]} \delta^k ; \quad (1)$$

ряди (1) підставляються в рівняння і граничні умови задачі; наводяться і покладаються рівними нулю члени при однакових ступенях  $\delta$ . Таким чином, при відомому нульовому наближенні отримують рівняння, лінійні щодо наступних наближень.

Основні припущення:

1. Використовуємо методи теорії тонких оболонок (так як  $\frac{S_0}{R_1} \ll$

1).

Сама оболонка утворена обертанням дуги кола радіуса  $R_2$  (рис. 1).

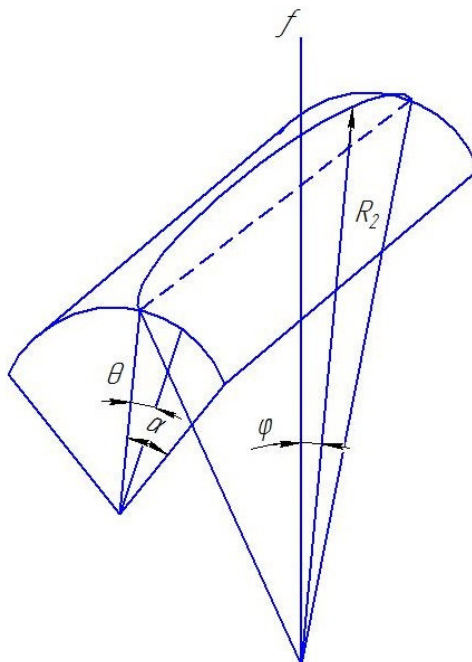


Рис. 1. Геометрія оболонки

2. Нехтуємо вигинними деформаціями в поперечному до дії сили напрямку (зважаючи близькості схеми до плоскої деформації і  $R_2 \gg R_1$ , де 1 – поздовжнє, а 2 – поперечний напрямки).

3. Розглядається переважно розтягнення (мінімальна деформація розтягування більше згинальної).

4. Тертя підпорядковується закону Кулона (зважаючи невеликих контактних тисків).

Прийняті припущення дозволяють розглядати кожну елементарну смужку (між близькими поперечними перерізами) як циліндричну оболонку змінної товщини в умовах плоскої деформації (рис. 2).

Запишемо вихідні рівняння:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial v} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} = \sigma_\theta - \sigma_\rho,$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial v} + 2\tau_{\rho\theta} = 0, V = \ln \frac{\rho}{R}, \quad (2)$$

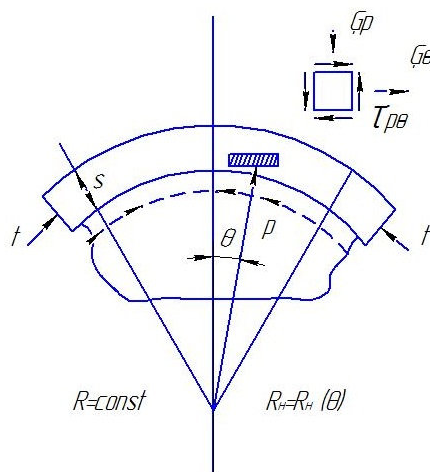


Рис. 2. Схема циліндричного вигину з розтягненням

$$\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_\rho)^2 + 4 \left(\frac{\tau_{\rho\theta}}{K_a}\right)^2} = q_\theta^n, \quad (3)$$

$$q_\theta = \sqrt{(q_\theta)^2 + \left(\frac{e_{\rho\theta}}{K_a}\right)^2}, \quad (4)$$

$$\tau_{\rho\theta}^- = -\mu\sigma_\rho^- \text{ при } V = 0 \ (\rho = R), \quad (5)$$

$$\tau_y^+ = 0, \sigma_y^+ = 0 \text{ при } V = V_H(\theta) \ [p = p_H(\theta)]. \quad (6)$$

Тут  $\sigma_{ij}$  – безрозмірні напруги, віднесені до наведеного коефіцієнта, що враховує схему плоскої деформації

$$K'_0 = \frac{K_\theta}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})^{0.5(1+n)}}, \quad (7)$$

де  $K_\theta$  і  $n$  – параметри степеневі апроксимації в тангенціальному напрямку, а  $\mu_{12}, \mu_{21}$  – коефіцієнти поперечної деформації в площині листа (перший індекс – напрямки поперечної деформації, другий – дії сили),  $K_a$  – коефіцієнт анізотропії;  $\bar{\mu}$  – коефіцієнт тертя;  $\tau_y^+, a_y^+$  – напруги на похилому майданчику, дотичній до вільної поверхні  $V = V_n(\theta)$ .

Всі лінійні розміри віднесені до первісної товщині листа  $S_0$ . Оцінка зсувних напруг і швидкості деформації показала, що їх величина має порядок  $\delta$  і з точністю до  $\delta^2$   $\sigma_\theta - \sigma_\rho = q_\theta^n$ :

$$\dot{q}_\theta = \dot{e}_\theta, q_\theta = e_\theta = q_0 + \delta q_1 + V, \quad (8)$$

де  $q_k = q_k(\theta)$  – поки невідома функція.

Тут враховано, що  $V < \delta$ , і використовується розкладання

$$\Phi(\theta, V) = \sum_{k,m=0}^{\infty} \Phi_{k,m}(\theta) \delta^k V^m.$$

У теорії тонких оболонок [5] замість (2) застосовуються рівняння рівноваги в узагальнених напругах ( одиничних зусиллях ):

$$t - \frac{dt}{d\theta} = \frac{1}{\delta} \left( e^{V_H} \sigma_p^+ - \sigma_p^- + \tau_{p\theta}^+ e^{V_H} \frac{dV_H}{d\theta} \right),$$

$$\frac{dt}{d\theta} + \tau = \frac{1}{\delta} \left( \tau_{p\theta}^- - \tau_{p\theta}^+ + \sigma_\theta^+ e^{V_H} \frac{dV_H}{d\theta} \right), \quad (9)$$

де  $t = \int_R^{R_H} \sigma_\theta dp$ ,  $\tau = \int_R^{R_H} \tau_{p\theta} dp$ .

Звідси видно, що хоч напруга  $\sigma_p, \tau_{p\theta}$  і характеристики відхилення вільного кордону від  $R_H = const$  мають порядок меншості  $\delta$ , знехтувати цими величинами не можна, так як їх внесок у рівняння рівноваги (9) має порядок одиниці.

Із (2)...(6), (8) і (9) згідно стандартної методики методу збурень асимптоматичної похибки  $\delta^2$  маємо:

$$S = S^{[0]} + \delta S^{[1]},$$

$$\tau = \tau_0 + \delta \tau_1, \quad t = t_0 + \delta t_1. \quad (10)$$

Випишемо компоненти нульового і першого приближення через деформації нульового приближення  $q_0$ :

$$S^{[0]} = e^{-q_0}, \tau_0 = 0, t_0 = e^{-q_0} q_0^n, \quad (11)$$

$$S^{[1]} = e^{-q_0} q^n,$$

$$\tau_1 = \frac{1}{2} q_0^n e^{-2q_0} \left( \bar{\mu} - \frac{dq_0}{d\theta} \right),$$

$$t_1 = q_0^n e^{-q_0} \left( \frac{n}{q_0} - 1 \right) q_1 + q_0^n e^{-2q_0} \left( \frac{n}{2q_0} - 1 \right) = -t_0 (\varphi_0 + \bar{\mu}^2 \varphi_1). \quad (12)$$

Тут

$$\varphi_0 = e^{-q_e} - e^{-q_a} + 0.5n [E_i(q_0) - E_i(q_a)],$$

$$\varphi_1 = 4(e^{-q_0} - e^{-q_a})$$

$$+ 0.5n \left\{ \frac{e^{-q_0}}{n - q_0} - \frac{e^{-q_a}}{n - q_a} + E_i(q_0) - E_i(q_a) \right.$$

$$\left. + 4e^{-n} [E_i(q_a - n) - E_i(q_0 - n)] \right\},$$

де  $E$  – інтегральна показова функція [6],  $q_a = q_0$  при  $\theta = 0$ , тобто деформація на краю оболонки.

Для  $q_0$  має диференціальне рівняння

$$\frac{dq_0}{d\theta} = \frac{\bar{\mu} q_0}{n - q_0}. \quad (13)$$

Із (13) і (11) отримаємо:

$$e^{-q_0} q_0^n = t_a e^{\bar{\mu}(\theta - a)}, \quad (14)$$

де  $t_a$  – розтяжне зусилля на краю оболонки.

Із (13) видно, що при

$$q_0 \rightarrow n = (1 + \delta_p), \frac{dq_0}{d\theta} \rightarrow \infty,$$

тобто процес втрачає стійкість. Це відображає граничні можливості процесу. Таким чином, деформація при переході повинна бути менш рівномірною  $\delta_p$ .

Це гарно ілюструється графіком (рис. 3) відображаючи зміни товщини оболонки  $S$  в залежності від кута  $\theta$ . Із нього видно, що при  $q_0 = n$  на краю оболонки спостерігається різке стоншування.

При вирахуванні зусилля і пружності використовують тільки нульове наближення. Безрозмірне зусилля визначається інтегруванням  $t_a$  по ширині оболонки (по куту  $\varphi$ ) і після переходу до розмірних величин при максимально допустимій деформації  $\delta_p$ .

$$P \approx \frac{\sigma_{b\theta} F_0}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})^{0,5(1+n)}}, \quad (15)$$

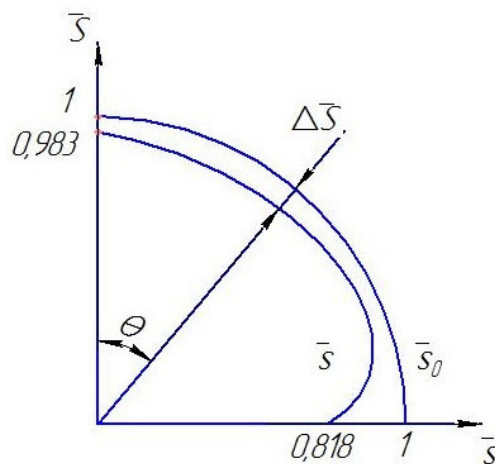


Рис. 3. Зміна товщини оболонки  
( $q_a = n = 0,2, \bar{\mu} = 0,2$ , обтягування на  $180^\circ$ )

$$P \approx \frac{\sigma_{b\theta} F_0}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})^{0,5(1+n)}}, \quad (15)$$

де  $F_0$  – площа початкового поперечного (у відношенні до розтягуючого зусилля) перетину листа.

Під час визначення пружної віддачі із-за великої поперечної жорсткості оболонки, як і у випадку згину широкого плоского листа, нехтуємо пружними змінами у поперечному напрямку. Однак, на відміну від звичайного вигинання, після обтягування лист набуває форми криволінійного тонкостінного профілю.

Із врахуванням цього за умови рівності нулю залишкового згинального моменту в подовженому напрямлені вираховуються зміни кривизни  $x = x(\theta)$ . Відхилення від заданої форми  $W$  визначаються за значенням  $x$  із відомого диференціального рівняння

$$\frac{W}{R_1} = \frac{E_p}{E_\theta} [1 - e^{-\bar{\mu}a} (\cos \alpha + \bar{\mu}),$$

тут  $E_\theta = \frac{E_\theta}{1 - y_{12} y_{21}}$  – приведений модуль Юнга, де  $y_{ij}$  – коефіцієнти Пуассона,  $E_p = K'_\theta n e_\pi^{1-n}$  – наведений пластичний модуль, де

$$e_\pi = e_{max} - \frac{f}{3R_1},$$

$f$  – стрілка прогину (рис. 1).

*Висновки.* Методом збурень із врахуванням здвигових напруг і деформацій вирішена задача із визначенням технологічних параметрів процесу звичайної обтяжки: зусилля, пружіння і граничних можливостей матеріалу.

Встановлено, що процес формування відбувається в умовах плоско-деформованого стану.

Задовольнити вимоги, які пред'являються до деталей, можливо, якщо аналітично представити умови, які є функціоналом, а потім вирішити ці умови.

Функціонал потребує наближення технологічно можливої товщини до заданої товщини деталі, при умовах мінімального відхилення зі сторони між двома функціями товщини.

Розроблена методика проектування процесу формовки тонкостінної осесиметричної деталі усіченої звужувальній формі, яка дозволяє отримувати рівномірні товщини за рахунок дії активних сил тертя між пуансоном та заготовкою, які перерасподілюють напругу в меридіональному напрямленні, зменшуючи їх у зоні найменшого діаметру і збільшуючи у зоні найбільшого діаметру звужувальній формі (при співвідношенні  $D$ ).

#### Література:

1. Рыбин Ю. И., Рудской А. И., Золотов А. М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. Москва: Наука, 2004. 644 с.
2. Ивлев Д. Д., Ершов Л. В. Метод возмущений в теории упругопластического тела. Москва: Наука, 1978. 208 с.
3. Найфэ А. Х. Методы возмущений. Москва: Мир, 1976. 455 с.
4. Определение оптимальных условий штамповки осесимметричных оболочек оживальной формы / А. А. Имшенецкий и др. Харьков: Харьк. авиац. ин-т. 2001. 120 с.
5. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек. Москва: Наука, 1976. 512 с.
6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. Москва: Наука, 1967. 608 с.
7. Филлин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого

тела. Москва: Наука, 1978. 616 с.

8. Попов Е. А., Ковалев В. Г., Шубин И. Н. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебник. Москва: Из-во МГТУ им. Баумана, 2000. 480 с.

9. Пыхтеева И. В., Спиринцев В. В., Дмитриев Ю. О. Разработка функциональной схемы процесса автоматизованого проектування // Системні технології. Дніпропетровськ, 2013. Вип. 5. С. 130-136.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОСТОЙ ОБТЯЖКИ

Пыхтеева И. В., Ивженко А. В., Лубко Д. В.

*Аннотация* – современные тенденции развития различных отраслей промышленности стимулируют развитие высокой производительности и конкурентоспособных видов техники и технологий, которые будут обеспечивать строгие требования к качеству и эксплуатационным свойствам продуктов при экономии материальных, энергетических ресурсов и трудовых затрат, снижение себестоимости производства, что имеет важное значение для машиностроения.

Типичные продукты авиации, машиностроительной индустрии – это корпусная оболочка из листовой заготовки (обшивки, топливные баки различных форм и размеров, резервуары для хранения газа, камеры сгорания двигателей и т.д.). К ним предъявляются высокие конструктивные требования, которые определяют технологические возможности производства деталей: геометрическая точность, качество поверхности, механические свойства, равномерная толщина, надежность в эксплуатации.

При этом условно тонкостенными будем считать те части, в которых асимметричные детали с усеченной суженной формы с относительной  $D$  высотой  $H$ :  $0,5 (-<0,7$  и диаметр корреляции  $- = 1.7-=-2.2., D d$

Нам известно, что разнотолщинность многократной витяжки равна – 50-100%. Это одна из главных причин для уменьшения формообразования на следующих операциях.

Мы будем рассматривать формирование тонкостенной штамповки и снижение коэффициента материала, потому что не всегда результат изменения толщины, его значение для штампованных деталей отвечает необходимым критериям. Чтобы избежать этого исходную толщину заготовки выбирают



увеличенной на определенную величину разнотолщинности.

## **SOLUTION OF THE PROBLEM FOR DETERMINING THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE PROCESS OF A SIMPLE STRETCHING FORMATION**

I. Pyhteeva, O. Ivgenko, D. Lubko

### *Summary*

Modern trends in the development of various industries stimulate the development of high productivity and competitive types of equipment and technologies that will ensure strict requirements for the quality and performance of products while saving material and energy resources and labor costs, reducing production costs, which is important for mechanical engineering.

Typical produce of the aviation and engineering industries include the casing of the plate stock (covering, fuel tanks of various shapes and sizes, gas storage tanks, engine combustion chambers, etc.). These parts have to correspond to high design requirements that determine the technological capabilities thereof: geometric accuracy, surface quality, mechanical properties, uniform thickness, reliability in operation.

In this case, those parts will be accepted as conditionally thin-walled, where asymmetric parts with a truncated constricted shape with a relative  $D$  height  $H$  being  $0.5 (- < 0.7$  and the diameter of the correlation being  $= 1.7 - 2.2$ ,  $D d$

The purpose of a technologist is to develop the technological process with a minimum number of transitions, a high utilization rate of the material, and precise geometric parameters. In addition, the manufactured model must meet the specified performance characteristics. In achieving this result, it is important to take into account the thickness variation of the parts produced in sheet metal forming. We know that the thickness variation of multiple stretching is  $50-100\%$ . This is one of the main reasons for reducing shaping in the following operations.