

Шемшурова Н.Г. Совершенствование конструкции и развитие технологии производства гнутых профилей повышенной жесткости // Вестник МГТУ. 2007. № 1. – С. 67-70. **15.** Урмацких А.В., Шемшурова Н.Г. Разработка технологии производства гнутых профилей с гофрами замкнутой формы // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 2. – С. 68-69. **16.** Урмацких А.В., Шемшурова Н.Г. Листовые гнутые профили проката с углами подгибки элементов более 90 градусов // Стройметалл (www.dorvest.ru). 2008. №3. – С. 30. **17.** Урмацких А.В., Шемшурова Н.Г., Куряев Д.В. Энергосиловые параметры производства гофрированных листов с осадкой гофров // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: Международный сб. науч. тр. / Под ред. Н.Н. Огаркова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – С.79-85. **18.** Особенности формоизменения гофров при осадке между плоскими пуансонами / А.В. Урмацких, Г.В. Щуров, В.Л. Корнилов, Н.Г. Шемшурова // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегиональный сб. науч. трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – С.133-141. **19.** Пат. РФ на изобретение № 2360757, МПК В21D 13/10, В21D 5/06. Листовой гнутый профиль / Д.В. Куряев, А.В. Урмацких, Н.Г. Шемшурова // БИМП, 2009. № 19.

УДК 621.771

Ю.О. ПЛЕСНЕЦОВ, канд. техн наук, зав. каф. «ОМТ», НТУ «ХПИ»
О.С. ЗАБАРА, інженер, ТОВ «ІПРИС-профіль», м. Харків
Т.Л. КОВОРТНИЙ, асистент, НТУ «ХПИ»
М.С. ЛЮБИМОВ, студент, НТУ «ХПИ»

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ ВАЛКОВОМУ ФОРМУВАННІ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ ЗАМКНЕНОГО ПЕРЕТИНУ

В роботі для аналізу напружено-деформованого стану металу при валковому формуванні гнутих профілів замкнутого перетину і визначення параметрів, що характеризують процес, використаний інженерний метод. Визначені компоненти напружено-деформованого стану металу за схемою циліндричного вигину та енергосилові параметри процесу для тонкостінної труби діаметром 20 мм, завтовшки 1,0 мм.

В работе для анализа напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке гнутых профилей замкнутого сечения и определения параметров, характеризующих процесс, использован инженерный метод. Определены компоненты напряженно-деформированного состояния металла по схеме цилиндрического изгиба и энергосиловые параметры процесса для тонкостенной трубы диаметром 20 мм толщиной 1 мм.

In current work for analysis of stress-deformed state of metal during roll forming of closed section roll forms and defining of process-characterizing parameters an engineering method was used. The components of stress-deformed state of metal are defined by the scheme of cylindrical bending as and energy-power parameters of process for thin-walled tube with diameter of 20 mm and wall thickness of 1 mm.

Аналіз науково-технічних і патентних джерел інформації, виконаних раніше, показав що попередні дослідження спрямовані на реалізацію технологій виробництва гнутих профілів замкнутого перетину (ГПЗП) із заготованки $s=2$ мм

і більш. У той же час процес виготовлення ГПЗП до 2 мм не досліджений. Питанням розробки сортаменту ГПЗП з місцями вигину на 360° і освоєння їх виробництва в Україні приділяється значна увага у зв'язку з ефективним їх застосуванням.

До теперішнього часу ГПЗП невеликих діаметрів постачалися в Україну виключно з-за кордону. І тому створення імпортозамінних технологій в Україні є важливим і актуальним.

Таким чином, дослідження, пов'язані з формозміною місць вигину металу і розробкою практичних рекомендацій за технологією виготовлення ГПЗП, дозволяє створити наукові і технологічні основи для організації їх виробництва в Україні.

Мета роботи - створення теоретичної моделі валкового формування ГПЗП.

Для обґрунтованого вибору параметрів раціональної технології профілювання, необхідно досліджувати характер напружено-деформованого стану металу за схемою циліндричного вигину.

Для вирішення завдання, що дозволяє визначити компоненти напружено-деформованого стану металу застосований інженерний метод.

Для вирішення завдання інженерним методом необхідно замінити точну умову пластичності (1) наближеною (2).

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 = \sigma_s^2 \quad (1)$$

$$\sigma_x - \sigma_z = \pm \sigma_s \quad (2)$$

При вигині моментом деформований стан можна вважати плоским, а напружений об'ємним. Напружений стан металу визначається вирішенням системи диференціальних рівнянь рівноваги спільно з рівнянням пластичності. Стосовно місця вигину профілю в циліндричній системі координат r, φ, z (рис. 1) рівняння мають вигляд [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\varphi}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi} &= \pm \sigma_s \\ \sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz} &= \pm \sigma_s, \\ \sigma_{zz} - \sigma_{rr} &= \pm \sigma_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{zz}$ - головні нормальні напруження;

$\tau_{r\varphi}, \tau_{rz}, \tau_{\varphi z}$ - дотичні напруження;

σ_s - напруження плину.

Оскільки напруження, перпендикулярні до серединної поверхні заготовки, малі в порівнянні з напруженнями, що діють паралельно дотичним до серединної поверхні, то схема напруженого стану з достатньою точністю може

бути прийнята пласкою. Для плоского напруженого стану рівняння рівноваги в циліндрових координатах має вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{2\tau_{r\varphi}}{r} = 0$$

З приведених рівнянь видно, що для плоского напруженого стану диференціальні рівняння рівноваги є системою з двох рівнянь з трьома невідомими.

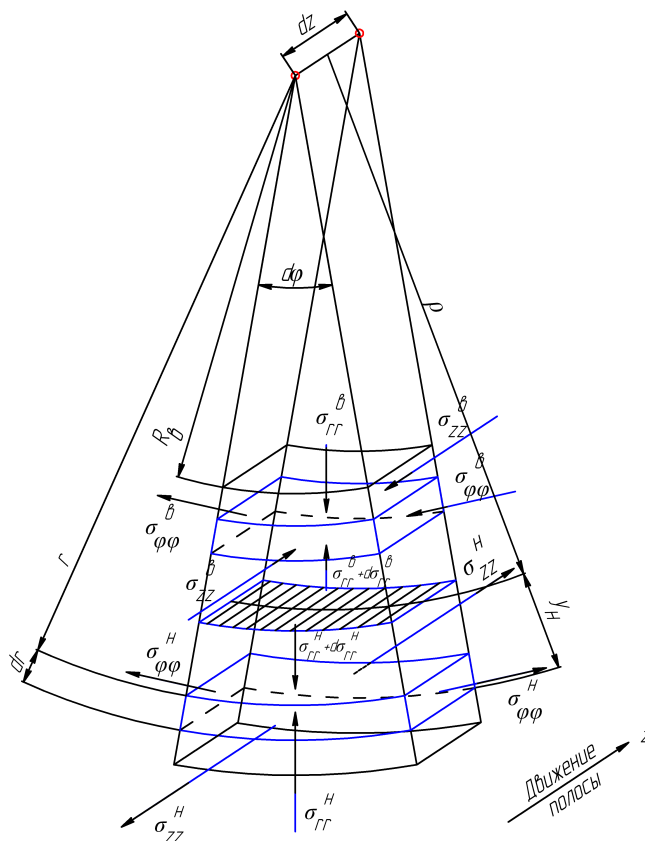


Рис. 1. Схема напруженого стану металу в місці вигину профільованої смуги

При формозміні місця вигину виділеного елемента відповідно до схеми циліндричного вигину компоненти тензора напруження не залежать від координати φ ; вплив дотичних напружень на характер напружено-деформованого стану незначний, і ними можна знехтувати. Тоді відповідно до схеми на рис. 1 рівняння рівноваги зводяться до одного:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0, \quad (6)$$

а рівняння пластичності формула (2) переписеться у вигляді:

$$\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi} = \pm \sigma_s. \quad (7)$$

Інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги спільно з умовою пластичності дозволяє визначити функції розподілу напружень $\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}$ по товщині смуги [3]:

- для зовнішньої зони:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= -\sigma_s \cdot \ln \frac{R_H}{r}, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= -\sigma_s \cdot \left(1 - \ln \frac{R_H}{r}\right),\end{aligned}\quad (8)$$

- для внутрішньої зони:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= -\sigma_s \cdot \ln \frac{r}{R_B}, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= -\sigma_s \cdot \left(1 + \ln \frac{r}{R_B}\right),\end{aligned}$$

де r – радіус нейтральної поверхні;

R_H, R_B – радіуси зовнішньої і внутрішньої поверхні стрічки.

З формул (8) видно, що напруження σ_{rr} зростають по абсолютній величині у міру видалення від поверхонь заготованки.

Назвемо поверхню, на якій напруження σ_{rr} , розраховані по рівняннях (8), стають однаковими, а напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ змінює знак, нейтральною поверхнею. Позначимо її радіус через r_H . Радіус r_H знайдемо з формул (8):

$$\sigma_s \cdot \ln \frac{R_H}{r} = \sigma_s \cdot \ln \frac{r}{R_B},$$

отримаємо:

$$r_H = \sqrt{R_H R_B}. \quad (9)$$

З формул (8) і (9) можна знайти найбільше (по абсолютному значенню) напруження, що діє на нейтральній поверхні :

$$\sigma_{rr \max} \approx -\frac{1}{2} \sigma_s \ln \frac{R_H}{R_B}. \quad (10)$$

З формули (10) видно, що при $r/s > 5$ максимальне (за абсолютним значенням) напруження $\sigma_{rr \max}$ не перевищує 1/10 напруження плинину; і в цьому випадку з достатньою мірою точності впливом напруження σ_{rr} на рівень тангенціальних напружень можна знехтувати, а напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ прийняти постійним, яке за абсолютним значенням дорівнює напруженню плинину.

При профілюванні тонких листів в холодному стані відбувається зміцнення металу. В цьому випадку крива істинних напружень досить точно апроксимується степеневою функцією [3]. Спільне вирішення диференціального рівняння рівноваги і умови пластичності із змінною правою частиною у формі

$$\sigma_s = A \left(\ln \frac{r}{r_H} \right)^n$$

дозволяє отримати рівняння для визначення σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$ у такому вигляді:

- для зовнішньої зони:

$$\sigma_{rr} = -\frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{R_H}{r} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{r}{r_H} \right)^{n+1} \right],$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = A \left(\ln \frac{r}{r_H} \right)^n - \frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{R_H}{r} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{r}{r_H} \right)^{n+1} \right], \quad (11)$$

- для внутрішньої зони:

$$\sigma_{rr} = -\frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{r_i}{R_i} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{r_i}{r} \right)^{n+1} \right],$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = -A \left(\ln \frac{r_H}{r} \right)^n - \frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{r_H}{R_H} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{r_H}{r} \right)^{n+1} \right],$$

де A, n – коефіцієнти, які знаходять по експериментальній кривій зміцнення.

При формоутворенні криволінійних ділянок профілів у ряді технологічних проходів на ділянці плавного переходу по товщині можна виділити області пружного і пластично деформованого металу.

Умова сталості об'єму визначається за формулою:

$$e_{rr} + e_{\varphi\varphi} + e_{zz} = 0. \quad (12)$$

де $e_{rr}, e_{\varphi\varphi}, e_{zz}$ – головні радіальні, тангенціальні та аксіальні деформації.

Якщо прийняти, що при встановленій стадії підгину для більшої частини довжини заготовки, за винятком кінцевих ділянок, деформований стан металу місця вигину плоский внаслідок порівняно малих аксіальних деформацій, то з умови сталості об'єму $e_{rr} = -e_{\varphi\varphi}$. Отже, інтенсивність деформацій пластичного формоутворення має вигляд [3]:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi\varphi}. \quad (13)$$

Тангенціальна деформація визначається за формулою:

$$e_{\varphi\varphi} = \ln \frac{r + y_H}{r} \approx \frac{y_H}{r}. \quad (14)$$

де y_H – відстань від матеріальної точки смуги до нейтрального шару деформацій;

r – радіус кривизни нейтрального шару напружень.

Взаємозв'язок між напруженнями і деформаціями для волокон перетину в активній стадії пружно-пластичного вигину з необхідною мірою точності апроксимується лінійно-степенною залежністю (від нуля до апроксимованої межі пропорційності – лінійною залежністю і для пластичної області степенною).

Тоді для пружної області інтенсивність напружень визначаємо за формулою:

$$\sigma_i = \sigma_{\varphi\varphi 1} = E e_i = E \left(\frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi\varphi} \right). \quad (15)$$

Інтенсивність напружень при степеневому законі зміцнення металу

$$\sigma_i = \sigma_{\varphi\varphi 2} = A(e_i)^n = A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi\varphi} \right)^n. \quad (16)$$

Для визначення граничної поверхні, що розділяє області пружної і пластичної деформації на ділянці плавного переходу позначимо поточну ординату цієї поверхні через y_s .

Якщо прийняти, що перехід від пружних деформацій до пластичних виникає при $e_{\varphi\varphi} = e_{0.2}$, де $e_{0.2}$ при вигині без зміцнення є умовною межею плинності, то величину y_s можна пов'язати з радіусом кривизни серединної поверхні, використовуючи закон Гука [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot (\rho_s - \rho_H) &= \sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot (R - \rho_s) \\ \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot \rho_s - \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot \rho_i &= \sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot R - \sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot \rho_s \\ \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot \rho_s + \sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot \rho_s &= \sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot R + \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot \rho_i \\ \rho_s (\sigma_{\varphi\varphi 1} + \sigma_{\varphi\varphi 2}) &= \sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot R + \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot \rho_i \\ \rho_s &= \frac{\sigma_{\varphi\varphi 2} \cdot R + \sigma_{\varphi\varphi 1} \cdot \rho_i}{\sigma_{\varphi\varphi 1} + \sigma_{\varphi\varphi 2}} \\ y_s &= 2 \cdot \frac{A \cdot e_i^n \cdot r}{2E \cdot e_i}. \end{aligned} \quad (17)$$

Момент в місці вигину смуги можна визначити як момент напруження, що виникає в перетині (з розрахунком на одиницю довжини смуги):

$$M = 2 \int_0^{s/2} \sigma_{\varphi\varphi} y_H dy_H. \quad (18)$$

Момент, що вигинає, на підставі виразів (13-17) при пружно-пластичному вигині для одиниці довжини смуги визначатиметься залежністю:

$$M = 2 \left[\int_0^{y_s} E \frac{y_H^2}{r} dy_H + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n s/2} \int_{y_s}^R A \left(\frac{y_H}{r} \right)^n dy_H \right]. \quad (19)$$

Визначення енергосилових параметрів процесу

Визначення зусилля згинання смуги. Найбільш відповідальним завданням конструкторських і технологічних розрахунків є метод аналітичного розрахунку зусиль і моментів, що виникають при безперервному згинанні смуги, запропонований Ю.М. Матвєєвим [2].

Елементарний момент внутрішніх сил dM_s при вигині на нескінченно малій площинці визначаємо за формулою (19).

Усереднений момент діючих зовнішніх сил визначається залежністю:

$$M_{д.ср.} = \frac{P_{ср.} \cdot b_H}{4}, \quad (20)$$

де $P_{ср.}$ – середня величина зусилля;

b_H – ширина стрічки.

Прирівнюючи моменти внутрішніх (19) і зовнішніх сил (20), значення середньої величини зусилля визначається залежністю:

$$P_{ср.} = \frac{M \cdot 4}{b_H}. \quad (21)$$

Вважаючи, що зусилля $P_{ср.}$ прикладене посередині довжини осередку деформації l_D (рис. 3), крутний момент для двох валків визначається залежністю:

$$M_{кр.} = 2P_{ср.} \frac{l_D}{2}. \quad (22)$$

Довжину осередку деформації l_D визначаємо з геометричних співвідношень, яка відповідає відстані від моменту першої зустрічі металу з валками до лінії центрів валків залежністю[3]:

$$l_D = \sqrt{\frac{R_H - R'_H}{R_H + R_B} \cdot R_H \cdot R_B}, \quad (23)$$

де R_H, R_B – зовнішній та внутрішній радіус валка.

При безперервному згинанні деформація смуги починається задовго до зустрічі з валками. Довжина деформації з врахуванням позаконтактної деформації значно перевищує довжину геометричного (контактного) осередку деформації.

Згідно [2], зусилля, яке потрібне для згинання смуги, прикладено в місці зустрічі смуги з валками, визначуваної кутом γ , і створює на ділянці штаби довжиною $l_{мом.}$ момент, що вигинає. Ця довжина фактична. Довжина осередку деформації визначається з геометричних співвідношень, якщо вважати, що осередок деформації поширюється по смугі до тієї точки, з'єднавши яку з центрами валків, можна отримати кут рівний 0.5γ . Значення кута γ і довжину осередку деформації визначаємо за допомогою програми «Компас+ v12».

При розгляді енерговитрат на профілювання визначають роботу, що витрачається на згинання прямого бруса одиничної довжини, прирівнюючи її до роботи, що витрачається на підгинання криволінійних елементів профілю [1]:

$$A_{об} = \sigma_B \frac{s^2}{4} \sum \varphi_i. \quad (24)$$

де $A_{об}$ – робота, що витрачається на підгинання криволінійних елементів профілю;

$\sum \varphi_i$ – сумарний кут підгинання окремих елементів профілю.

Оскільки напруження по всьому перетину не дорівнює межі міцності σ_B і залежать від кривизни місця вигину, то $A_{об}$ визначаємо за формулою:

$$A_{об} = \sum_{n=1}^8 P_i \cdot l_i, \quad (25)$$

де P_1 – зусилля деформації;

l_1 – довжина осередку деформації.

Теоретична потужність стану, необхідна для здійснення роботи згинання профілю складного перетину без врахування втрат, пов'язаних з появою сил тертя рухомої заготовки об інструмент, і втрат, пов'язаних з кінематикою, відповідно до (25) визначається по формулі:

$$N_{\text{теор}} = 0,16A_{\text{об}}v, \quad (26)$$

де $N_{\text{теор}}$ – теоретична потужність стану;

v – швидкість профілювання.

Чисельну реалізацію отриманих математичних моделей здійснювали на ПК. Результати чисельної реалізації наведені у додатку В.

Роботу, що витрачається на згинання прямого бруса одиничної довжини дорівнює $A_{\text{об}} = 3,3$.

Теоретична потужність стану:

$$N_{\text{теор}} = 0,16 \cdot 3,3 \cdot 30 = 5,8 \text{ кВт}$$

Висновки: 1. В роботі для аналізу напружено-деформованого стану металу при валковому формуванні гнутих профілів замкнутого перетину і визначення параметрів, що характеризують процес, використаний інженерний метод.

2. Визначені компоненти напружено-деформованого стану металу за схемою циліндричного вигину.

3. Визначенні енергосилові параметри процесу для тонкостінної труби діаметром 20 мм, завтовшки 1,0 мм.

Список літератури: 1. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – М.: Metallurgiya, 1980. – 288 с. 2. Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб. – М.: «Metallurgiya», 1968. 3. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. «Машиностроение», 1977.