УДК 621.919

О. В. Грушко[1]

ВІДХИЛЕННЯ ВІД КРУГЛОЇ ФОРМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ПРИ ФОРМУВАННІ КОСИНУСОПОДІБНИХ ФІТИНГІВ ОСЬОВИМ СТИСКАННЯМ ТРУБИ

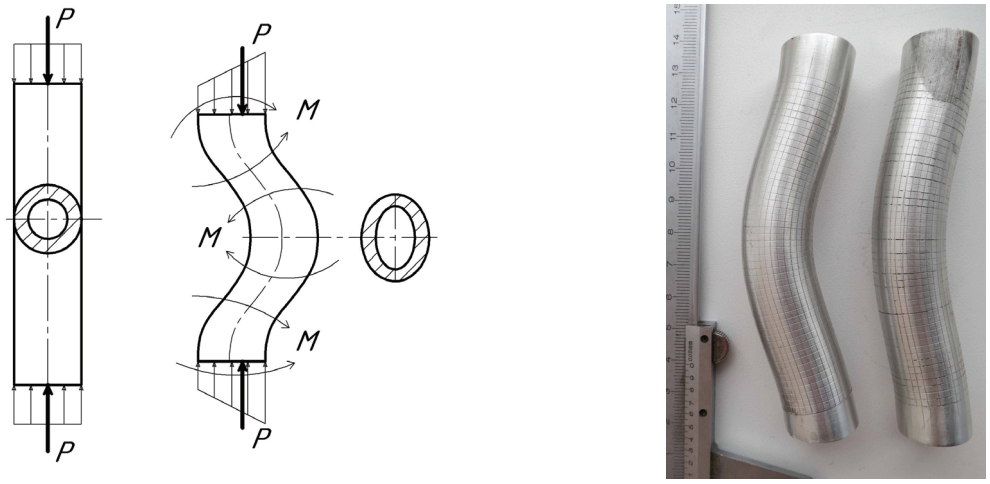
[1]Вінницький національний технічний університет

Розроблено метод оцінки відхилення від круглої форми перерізу при формоутворенні косинусоподібних фітингів, зігнутих осаджуванням трубної заготовки. У основі методу лежить енергетичний критерій стійкості і експериментально-розрахункові залежності напружено-деформованого стану. Початковими даними для розрахунку є геометричні параметри виробу і властивості матеріалу у вигляді показника деформаційного зміцнення.

Ключові слова: відхилення від круглої форми, втрата стійкості, показник деформаційного зміцнення, косинусоподібний фітинг.

Вступ

В процесі формоутворення зігнутих патрубків у вигляді косинусоїди за схемою стискання зі згином [1, 2] найпоширенішою і характерною ознакою бракування є відхилення від круглої форми перерізу, коли в процесі деформування центральний переріз стає овальним (рис. 1). Зазвичай, такий вид технологічної відмови передує виникненню гофри на внутрішній частині зігнутої заготовки, а також внутрішньої складки, яка називається затиском. Експерименти вказують, що на стабільність процесу формоутворення за інших рівних умов впливають механічні властивості металу, що відображаються в його карті [3].



а) б)

Рис. 1: а — осадження з вигином трубчастої заготовки; б — косинусоподібні фітинги

У низці робіт з дослідження стійкості пластичного формозмінювання відображені принципи, що дозволяють прогнозувати такий вид відмови. Зокрема, розв'язок для вільного згину труби [4], основано на енергетичному критерії і аналітичних залежностях напружено-деформованого стану в процесі формоутворення. Відомі дослідження вказують на достатню точність інженерних формул, які базуються на вказаному підході [5, 6].

Енергетичний критерій, покладений в основу подальших досліджень, полягає в тому, що за значень полів напружень і деформацій, які дійсно реалізовуються, варіація повної енергії системи набуває нульового значення [4, 7]:

$$\delta E = \delta(U - Q) = 0, \tag{1}$$

де E — повна енергія системи; Q — потенціал зовнішніх сил; U — повна робота внутрішніх сил.

© О. В. Грушко, 2015

Метою дослідження є прогнозування відхилення від круглої форми поперечного перерізу залежно від геометричних співвідношень виробу і параметрів карти металу для процесу формоутворення косинусоподібних фітингів за схемою осьового стискування трубної заготовки.

Матеріали і результати досліджень

Робота деформувальних сил визначається за переміщенням вектора прикладання сили і її величини. Оскільки величина деформувальної сили мало змінюється під час розвитку овальності, то варіацією потенціалів зовнішніх навантажень в цій задачі можна знехтувати $\partial Q \approx 0$.

Роботу внутрішніх сил знайдемо за величиною питомої роботи W:

$$U = \iiint_V W \cdot dV \,, \tag{2}$$

де V — об'єм тіла (заготовки).

Питома робота внутрішніх сил W знаходиться з виразу [7]

$$W = \int_0^{e_i^*} \sigma_i de_i \,, \tag{3}$$

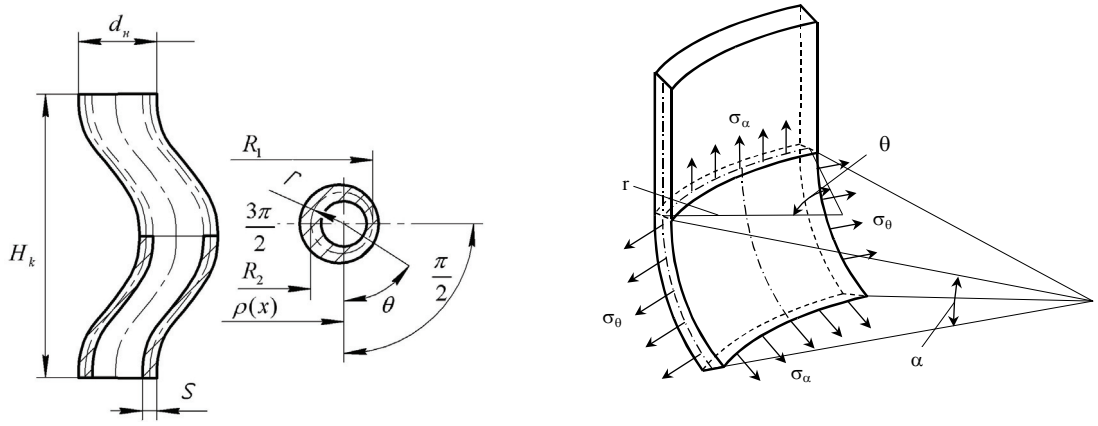
де σ_i, e_i — інтенсивність напружень і деформацій, відповідно.

Деформації вздовж осі запишемо таким чином [8]:

$$e_\alpha = \ln \frac{\rho + r\sin\theta}{\rho + e} \approx \frac{1 + \left(r\sin\theta\right)/\rho}{1 + \delta/(1+\delta)} - 1 = \frac{\delta/(1+\delta) - \left(r\sin\theta\right)/\rho}{1 + \delta/(1+\delta)} \,, \tag{4}$$

де ρ — поточний радіус кривизни зігнутої осі (рис. 2); $\delta = \left(a - b \cdot m_0\right) \cdot \varepsilon$ — емпірична функція відносного укорочення осі; a і b — коефіцієнти, які не залежать від виду матеріалу і геометрії заготовки; ε — ступінь осадження $\left(\varepsilon = \left(L_0 - H_k\right)/L_0\right)$; $m_0 = L_0/d_н$ — параметр заготовки; s_0, L_0 — початкова товщина стінки і висота заготовки; $d_н = 2r + s_0$ — зовнішній діаметр зразка; A та n — коефіцієнти апроксимації кривої течії згідно з виразом

$$\sigma_i = A e_i^n \,. \tag{5}$$



а) б)

$x_c = 0{,}5H_к$ — координата найбільшого прогину (центральна частина);

θ — координата радіус-вектора в коловому напрямі оболонки

Рис. 2: а — геометричні параметри косинусоїдальної зігнутої труби; б — схема напруженого стану

Деформації в окружному $\left(e_\theta\right)$ і радіальному $\left(e_s\right)$ напрямках

$$e_\theta = -e_\alpha \frac{r + \left(2r + \rho\right)\sin\theta}{2r + \left(2\rho + r\right)\sin\theta}; \quad e_s = e_\alpha \frac{r - \rho + r/\sin\theta}{r + 2\rho + 2r/\sin\theta} \,. \tag{6}$$

Головні напруження в меридіональному і коловому напрямках [8]

$$\sigma_\alpha = A e_\alpha{}^n 2^n \left(2 + \frac{r}{\rho + r\sin\theta}\right)^{-n} \left[1 + \frac{r}{\rho + r\sin\theta} + \left(\frac{r}{\rho + r\sin\theta}\right)^2\right]^{0,5n-0,5}; \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = -\sigma_\alpha \frac{r}{\rho + r\sin\theta}. \quad (8)$$

Для подальшого виведення залежностей опишемо геометричну вісь зігнутого патрубка дугами кіл. Приймемо $\rho(x) = \text{const} = R$.

У такому разі з геометричних міркувань

$$R = \frac{H_к}{4\sin\alpha}. \quad (9)$$

Центральні кути α (рис. 3) спільно з радіусами визначать довжину геометричної осі заготовки, яка з урахуванням зменшення своєї довжини за рахунок осадження буде дорівнювати

$$4\frac{H_к}{4\sin\alpha}\alpha = L_0(1-\delta). \quad (10)$$

Надалі вважатимемо кути α малими $(\alpha \le \pi/5)$, що робить можливим розкладання в ряд функції синуса. Необхідну для практичних розрахунків точність дає врахування перших двох членів $\sin\alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{6} + \ldots$ [9], в результаті

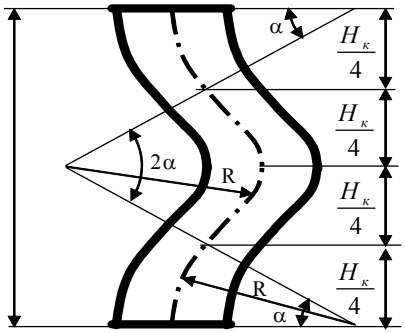
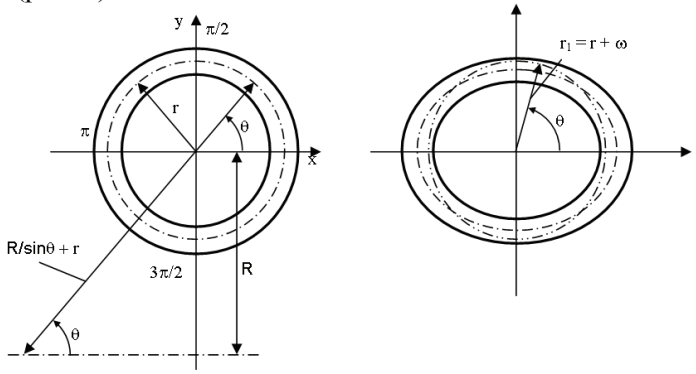


Рис. 3. Апроксимація геометричної осі фітинга дугами кіл

$$\alpha \approx \sqrt{6 - 6\frac{H_к}{L_0(1-\delta)}}. \quad (11)$$

Відхилення від круглої форми характеризуватимемо приростом радіус-вектора r початкового кола на величину ω (рис. 4).



а) б)

Рис. 4: а — початковий переріз заготовки; б — переріз з відхиленням від круглої форми (б)

Тоді осьова деформація запишеться таким чином:

$$e_{\alpha\Sigma} = \ln\frac{R + (\omega + r)\sin\theta}{R(1 + \delta/(1+\delta))} \approx \frac{\delta/(1+\delta) - (\omega + r)\sin\theta/R}{1 + \delta/(1+\delta)}. \quad (12)$$

Функція ω по суті визначає відхилення від круга серединної поверхні в довільній точці перерізу, що характеризується положенням радіус-вектора r по центральному куту θ. Розкладемо ω в тригонометричний ряд [9]. З урахуванням парності функції ω маємо:

$$\omega = C_1\cos 2\theta + C_2\cos 4\theta \ldots \approx C_1\cos 2\theta, \quad (13)$$

де C_1, C_2 ... — коефіцієнти ряду, що стрімко зменшуються зі зростанням порядкового номера.

Вираз радіуса-вектора, що характеризує серединну лінію в перерізі заготовки, набуде вигляду

$$r_1 = r + \omega = r + C\cos 2\theta, \tag{14}$$

де C — параметр, що визначає амплітудне максимальне відхилення r_1 від r, тобто величину, за якою можна судити про відхилення форми перерізу від круга. Для подальших міркувань припускаємо, що C $<< r$.

Пошук величини параметра C залежно від технологічних параметрів і властивостей металу є практичною стороною дослідження.

Деформація в коловому напрямі в перерізі некруглої форми може бути представлена як сума величини деформації для ідеально круглого перерізу і приросту $e_{\theta 0}$, що виникає унаслідок овалізації

$$e_{\theta\Sigma} = e_\theta + e_{\theta 0}. \tag{15}$$

Величина приросту колових деформацій $e_{\theta 0}$ в довільній точці перерізу може бути знайдена з умови незмінності довжини серединного кола перерізу. Таке припущення виконується з точністю до 97 % і перевірене як експериментально, так і за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Також введемо припущення про справедливість гіпотези Кірхгофа–Лява плоских нормалей, приведених до поверхні оболонки труби, що також знайшло підтвердження за МСЕ (рис. 5). Тобто радіус-вектори по товщині стінки не отримують викривлення, коли переріз перетвориться в овальний. Справедливість введених припущень розповсюджується на зону незначних пластичних деформацій (до 0,3...0,5) [4].

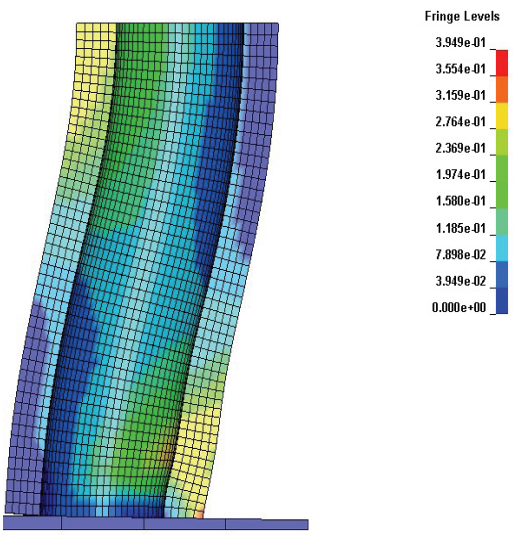


Рис. 5. Формозмінювання трубної заготовки і епюри інтенсивності деформацій, отримані за МСЕ

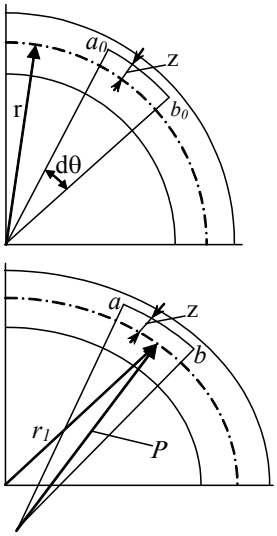


Рис. 6. Схема деформації волокна *ab*

З геометричних міркувань запишемо (рис. 6)

$$e_{\theta 0} \approx \varepsilon_{\theta 0} = \frac{ab - a_0 b_0}{a_0 b_0} = \frac{(P+z)d\theta' - (r+z)d\theta}{(r+z)d\theta} = \frac{r + (r \cdot z \cdot P)}{r+z} - 1 = \frac{r \cdot z}{r+z}\left(P - \frac{1}{r}\right), \tag{16}$$

де P — кривизна серединної лінії; z — координата волокна по відношенню до серединної лінії.

Кривизна функції, яка задана аналітично, знаходиться за залежністю, що в полярних координатах має вигляд [9]

$$P = \frac{r_1^2 + 2r_1'^2 - r_1 r_1''}{\left(r_1^2 + r_1'^2\right)^{3/2}}. \tag{17}$$

Після знаходження відповідних похідних і, нехтуючи величинами, в які входить C^2 (оскільки $C << r$), отримаємо:

$$P \approx \frac{r + 6C\cos 2\theta}{\sqrt{r}\left(r + 2C\cos 2\theta\right)^{3/2}}. \quad (18)$$

Подальші перетворення пов'язані зі застосуванням бінома Вандермонда [9], що приводить до виразу

$$P \approx \frac{r + 6C\cos 2\theta}{r\left(r + 3C\cos 2\theta\right)}. \quad (19)$$

Після підстановки (19) в (16) отримаємо:

$$e_{\theta 0} = \frac{z}{r+z} \cdot \frac{3C\cos 2\theta}{\left(r + 3C\cos 2\theta\right)}. \quad (20)$$

В результаті деформація $e_{\theta\Sigma}$, що враховує некруглу форму перерізу, перетвориться у вираз

$$e_{\theta\Sigma} = e_\theta + e_{\theta 0} = -\frac{\delta/(1+\delta) - \left(r\sin\theta\right)/\rho}{1 + \delta/(1+\delta)} \cdot \frac{r + \left(2r + R\right)\sin\theta}{2r + \left(2R + r\right)\sin\theta} + \frac{r + 6C\cos 2\theta}{r\left(r + 3C\cos 2\theta\right)}. \quad (21)$$

Інтенсивність накопичених деформацій запишеться у вигляді

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{{e_{\alpha\Sigma}}^2 + {e_{\theta\Sigma}}^2 + e_{\alpha\Sigma}e_{\theta\Sigma}}. \quad (22)$$

У формулі (2) диференціал об'єму представимо в тороїдальних координатах $dV = R(r+z)\cdot d\alpha \cdot d\theta \cdot dz$.

Тоді повну роботу внутрішніх сил можна знайти інтегруванням залежності (2), яка набуде такого вигляду:

$$U = 4\int_0^{\alpha}\int_0^{2\pi}\int_{-s/2}^{s/2} \frac{A}{n+1}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1}\left({e_{\alpha\Sigma}}^2 + {e_{\theta\Sigma}}^2 + e_{\alpha\Sigma}e_{\theta\Sigma}\right)^{1.5+n} R(r+z)\cdot d\alpha\cdot d\theta\cdot dz. \quad (23)$$

Вираз (23) містить в неявному вигляді параметр, який для дійсного напружено-деформованого стану надає виразу (2) екстремум (мінімум)

$$\frac{\partial E}{\partial C} = \frac{\partial U}{\partial C} = 0;$$

$$\frac{\partial 4\int_0^{\alpha}\int_0^{2\pi}\int_{-s/2}^{s/2} \frac{A}{n+1}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1}\left({e_{\alpha\Sigma}}^2 + {e_{\theta\Sigma}}^2 + e_{\alpha\Sigma}e_{\theta\Sigma}\right)^{1,5+n} R(r+z)\cdot d\alpha\cdot d\theta\cdot dz}{\partial C} = 0. \quad (24)$$

Зазначимо, що підінтегральний вираз від аргументу α не залежить, тоді після низки перетворень отримаємо

$$\int_0^{2\pi}\int_{-s/2}^{s/2} \frac{\partial\left({e_{\alpha\Sigma}}^2 + {e_{\theta\Sigma}}^2 + e_{\alpha\Sigma}e_{\theta\Sigma}\right)^{1,5+n}}{\partial C}(r+z)\cdot d\theta\cdot dz = 0. \quad (25)$$

Розв'язок рівняння (25) в квадратурах не знайдено, тому використані чисельні методи.

Виконана перевірка отриманих залежностей на прикладі формоутворення фітинга з латуні Л98. Початкові геометричні параметри заготовки: $d_0 = 14$ мм, $s_0 = 2{,}5$ мм, $l_0 = 73$ мм, $l_0/d_0 = 5{,}2$, $d_0/s_0 = 5{,}6$. Заготовку осаджували до розміру $H_k = 64$ мм ($\varepsilon = 0{,}137$) (рис. 7а). Експериментальні значення: довжина геометричної осі $L = 66$ мм; відносне зменшення довжини $\delta = 0{,}096$. Максимальне відхилення від круглої форми, яке спостерігається в площині симетрії заготовки, склало 0,3 мм, розрахунок дав значення $C = 0{,}33$ мм, що на 10 % відрізняється від експериментального. За МСЕ — $C = 0{,}32$ мм (похибка 6,7 %).

Оскільки під час виведення залежностей вважали овалізацію малою по відношенню до серединного радіусу, то вважатимемо величину $C_{\text{пр}} = 0{,}15r$ граничною. Отже, якщо за розрахунком

$C \geq C_{\text{пр}}$, то овалізація буде значною і неприпустимою для зігнутого патрубка. Так, при подальшому осадженні заготовки (рис. 7б) до розміру $H_k = 55$ мм за формулою (24) $C = 1,2$ мм, що значно більше $C_{\text{пр}} = 0,1r = 0,86$ мм. Виміряне відхилення від круглої форми склало $C = 1,6$ мм.

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок про прийнятність запропонованих залежностей для розрахунку відхилення від круглої форми перерізу при виготовленні фітингів з косинусоїдальною віссю. Початковими для розрахунку величинами є геометричні параметри $(l_0/d_0$, d_0/s_0, $H_k)$ і властивості матеріалу (параметри його карти) у вигляді показника зміцнення n.

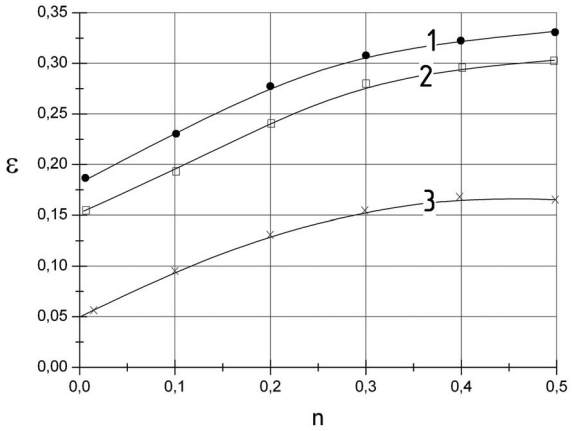
Особливий інтерес становить аналіз впливу показника n — одного з параметрів карти матеріалу — на величину максимального відхилення від круглої форми перерізу.

З використанням розроблених програм знаходили ступені деформацій, за яких значення овалізації складали $C_{\text{пр}} = 0,15r$. Варіювали співвідношенням l_0/d_0 = 4...6, n = 0,01...0,5 при d_0/s_0 = 5,5. Графіки граничних ступенів деформацій показані на рис. 8.

В результаті можна зробити висновок, що за інших рівних умов формозмінювання патрубка істотно залежить від показника деформаційного зміцнення n. Оскільки n залежить від партії постачання металу, то граничні значення технологічних параметрів, визначені за середніми (літературним) даними, як правило, відрізнятимуться від номінальних — для заготовки з цією геометрією. Якщо задатися відхиленням n ± 0,05, то значення граничних ступенів деформацій, розрахованих для меншого n – 0,05 і більшого n + 0,05; можуть розходитися до 25 %. Причому ця чутливість при n = 0,01...0,3 більша, ніж при n = 0,3...0,5 (рис. 8). Отже встановлення достовірної величини n є важливою умовою технологічної підготовки процесу з метою уточнення граничних величин і призначення необхідної початкової довжини і ступеня осадження заготовки. Величину n можна досить просто визначити в умовах виробництва за методом вимірювання вихідної твердості матеріалу заготовки [10].

а) б)

Рис. 7. Виріб: а — без істотної овалізації; б — зі значним відхиленням від круглої форми (матеріал — латунь Л98)



1 — $l_0/d_0 = 4$, $d_0/s_0 = 5,5$;

2 — $l_0/d_0 = 5$, $d_0/s_0 = 5,5$;

3 — $l_0/d_0 = 6$, $d_0/s_0 = 5,5$

Рис. 8. Залежність граничних ступенів деформацій ε до виникнення овалізації $C_{\text{пр}} = 0,15r$ від показника зміцнення n

Висновки

Розроблено експериментально-аналітичний метод оцінки розрахунку відхилення від круглої форми перерізу при формоутворенні патрубків, зігнутих осаджуванням. Початковими для розрахунку величинами є геометричні параметри $(l_0/d_0$, d_0/s_0, $H_k)$ і така властивість матеріалу як показник деформаційного зміцнення n. Граничне значення розрахункового відхилення від круглої форми складає $C_{\text{пр}} = 0,15r$. Виявлено, що за інших рівних умов овалізація істотно залежить від

показника n. Значення граничних ступенів деформацій, розрахованих для граничних n, з урахуванням можливого їх статистичного розкиду, можуть розходитися до 25 %. Уточнення величини n (наприклад, методом вимірювання твердості), середнє значення якого $n < 0{,}3$ є важливою умовою технологічної підготовки процесу формоутворення з метою розрахунку граничних величин, початкової довжини і ступеня осадження заготовки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кухарь В. В. Определение геометрических характеристик осевого сечения продольно изгибаемой трубной заготовки при переходе в пластическую область / В. В. Кухарь, О. А. Лаврентик, В. Н. Возненко // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. / СНУ ім. В. Даля. — Луганськ, 2005. — С. 73—79.

2. Кухарь В. В. Формоизменение при профилировании продольным изгибом заготовок с различной формой поперечного сечения / В. В. Кухарь // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Машинобудування». — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — № 60. — С. 169—173. — ISSN 2305-9001.

3. Грушко О. В. Феноменологічні аспекти створення карт матеріалів для процесів холодного пластичного деформування / О. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2013. — № 1 (34). — С. 85—95. – ISSN 2076-2151.

4. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. — Харьков, 1968. — 188 с.

5. Грушко А. В. Устойчивость пластического деформирования крутоизогнутых отводов / А. В. Грушко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. — Краматорськ : ДДМА, 2003. — С. 384—387. — ISBN 966-7851-10-9.

6. Анализ пластического формоизменения в частных задачах ковки и штамповки : моногр. / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. — Мариуполь : Газета «Приазовский рабочий», 2011. — 336 с.

7. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. — М. : Машиностроение, 1968. — 400 с.

8. Грушко А. В. Механика формообразования обводных патрубков продольным изгибом / А. В. Грушко, В. В. Кухарь, В. Н. Возненко // Наукові Вісті. Сучасні проблеми металургії. — Дніпропетровськ, 2005. — Т. IIX : Пластична деформація металів. — С. 499—502. — ISBN 966-8421-07-8.

9. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. — М. : Наука, 1973. — 831 с.

10. Грушко А. В. Определение параметров кривой течения материала по его твердости / А. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. — Краматорск : ДГМА, 2010. — № 2 (23). — С. 83—87. — ISSN 2076–2115.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів і прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.12.2014

Грушко Олександр Володимирович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри опору матеріалів і прикладної механіки, e-mail: grushko@svitonline.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Hrushko[1]

Deviation from the circular shape cross-section in the process of forming the cosine shaped fittings with axial compression of pipe

[1]Vinnitca National Technical University

The estimation method of deviation from the circular shaped cross-section in the shaping cosine shaped fittings, bend with pipe shell blank. The method is based on the energy stability criterion and experimental and calculated dependences of stress-strain state. Initial data for calculation are geometric parameters of the product and material properties as an rate of strain hardening.

Keywords: deviation from circular shape, buckling, the rate of strain hardening, cosine shaped fitting.

Hrushko Oleksander V. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of Resistance of Materials and Applied Mechanics, e-mail: grushko@svitonline.com

А. В. Грушко[1]

Отклонение от круглой формы поперечного сечения при формировании косинусообразных фитингов осевым сжатием трубы

[1]Винницкий национальный технический университет

Разработан метод оценки отклонения от круглой формы сечения при формообразовании косинусообразных фитингов, согнутых осадкой трубной заготовки. В основе метода лежит энергетический критерий устойчивости и экспериментально-расчетные зависимости напряженно-деформированного состояния. Первоначальными данными для расчета являются геометрические параметры изделия и свойства материала в виде показателя деформационного упрочнения.

Ключевые слова: отклонение от круглой формы, потеря устойчивости, показатель деформационного упрочнения, косинусообразный фитинг.

Грушко Александр Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: grushko@svitonline.com