

УДК 621.87

О. Ляшук, канд. техн. наук; А. Палюх, канд. техн. наук; А. Гупка

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМОУТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ПРОФІЛЬНИХ ГВИНТОВИХ ДЕТАЛЕЙ

Резюме. Наведено результати теоретичних досліджень напружено-деформованого стану виготовлення соленоїдів із труб прямокутного поперечного січення. Виведено аналітичні залежності для визначення граничних напружень у зоні згину соленоїда, зміна товщини його стінок і значення нейтрального радіуса згину, а також залежність моменту тангенціальних напружень від внутрішнього радіуса соленоїда.

Ключові слова: соленоїди, труба, напруження, радіус згину, стінка.

O. Lyashyk, A. Palyukh, A. Gupka

TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF SPECIAL PROFILE SHAPING PARTS SCREWS

The summary. The results of theoretical studies of the stress-strain state of manufacturing solenoids with rectangular cross-section tubes. Analytical dependence for determining the boundary zone of bending stresses in the solenoid, the thickness of its walls and value-neutral bending radius, and time dependence of tangential stresses on the inner radius of the solenoid.

Key words: solenoid, trumpet, tension, bending radius, wall

Умовні позначення

де c – радіус деформації, мм;
 σ_p – радіальні напруження, МПа;
 σ_u – тангенціальні напруження, МПа;
 ν – коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження;
 σ_s – напруження текучості матеріалу, МПа;
 σ_k – контактні напруження на внутрішньому радіусі;
 r – радіус оправки, мм;
 r_1 – радіус соленоїда на внутрішній стінці, мм;
 r_2 – радіус на зовнішній стінці, мм;
 r_3 – зовнішній радіус соленоїда, мм;
 K_m – коефіцієнт, що враховує конструктивні виконання оправки;
 l – відстань від центра оправки до центра формувального ролика, мм;
 m_p – приведений коефіцієнт тертя між роликом і трубою;
 S_0 – початкова товщина стінки, мм;
 dl_0 – елементарна довжина труби, мм;
 $d\alpha$ – елементарний кут, на який проходить навивання труби елементарної довжини dl_0 , град;
 S_1 – кінцева товщина стінки, мм;
 l – відносне видовження матеріалу.

Постановка проблеми. Широке використання соленоїдів у теплообмінниках, радіаторах, конденсаторах, а також використання індукційного нагріву для різних видів термообробки при виготовленні й відновленні деталей машин вимагає відповідних рекомендацій щодо методів проектування спеціального високопродуктивного технологічного обладнання й оснащення для їх виготовлення.

Недосконалість технологій їх виготовлення призводить до неточності виготовлення індукторів (рис. 1), наслідком чого є відхилення від геометричної форми, нерівномірність програтованого шару, вм'ятини та інше.

На рис. 1 зображено зразки індукторів для нагріву деталей при гартуванні струмами високої частоти.

При гартуванні профільних поверхонь штампового та іншого обладнання внутрішніх зубчастих вінців нерівномірність прогартованого шару призводить до неоднакових фізико-механічних властивостей прогартованих поверхонь, а, відповідно, і величини їх зношування.



Рисунок 1. Індуктори промислових зразків для нагріву деталей при гартуванні

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням моделювання технологічного процесу гнуття труб різних профілів займалися автори Зубцов М.Е., Гевко Б.М., Мошнін Е.М., Попов Е.А. [1, 2, 3, 4] та інші. Автори розробили багато математичних моделей технологічного процесу гнуття труб, однак не враховували ряду технологічних факторів і мають ряд припущень, що робить їх несумісними з реальними технологічними процесами на виробництві, особливо при гнутті й гартуванні.

Метою даної роботи є визначення напружено-деформованого стану соленоїдів при їх навиванні, виготовленні, а також зміни товщини стінок, зміни нейтрального радіуса згину, товщини стінок і залежність моментів тангенціальних напружень від внутрішнього радіуса соленоїда.

Роботу виконано в рамках постанови Кабінету Міністрів України “Про розвиток сільськогосподарського машинобудування і забезпечення агропромислового комплексу конкурентноздатною технікою” на 2010...2015р.

Результати дослідження. Одним із основних методів формоутворення гвинтових соленоїдів є навівання труб різного поперечного сечення на оправу на токарних і фрезерних верстатах. Схема цього процесу зображена на рис.2 [5].

У процесі навівання труб на оправу на внутрішній їх частині можуть утворюватися гофри, що є показником втрати стійкості при навіванні. Тому для запобігання цього явища використовують гальмівний ролик 4, внаслідок чого виникає поздовжня розтягуюча сила N . Для зменшення зусилля P формоутворення соленоїда з труб прямокутного поперечного сечення використовують індукційний нагрів, який позитивно впливає також на зменшення відпружинення соленоїда після формоутворення, оскільки при нагріві знімаються внутрішні напруження, що виникають під час процесу їх виготовлення.

У процесі навівання соленоїда поперечне сечення прямокутної труби умовно можна поділити на чотири зони, як це показано на рис. 2. Опишемо напружений стан і стан деформації, а також характер деформації в кожній зоні.

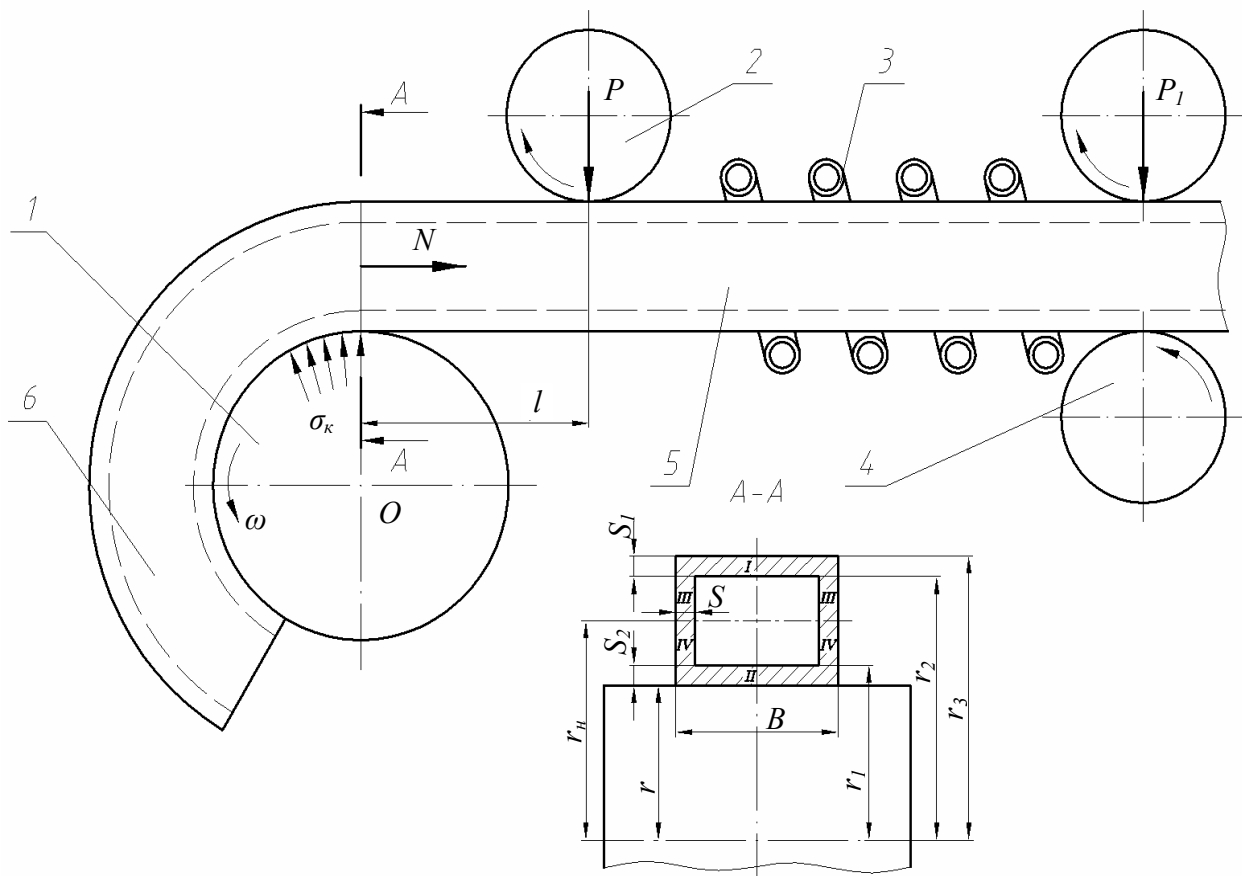


Рисунок 2. Розрахункова схема процесу формоутворення соленоїдів з труб прямокутного поперечного сечення:

1 – оправу; 2 – формувальний ролик; 3 – індуктор; 4 – гальмівний ролик; 5 – труба; 6 – соленоїд

У зоні *I* відбувається розтяг волокон матеріалу, при цьому спостерігається плоский стан деформації та об'ємний стан напружень зі зменшенням товщини стінки.

У зоні *II* відбувається стиск волокон матеріалу, стан деформації плоский, стан напружено-об'ємний, при цьому відбувається збільшення товщини стінки.

У зоні *III* відбувається розтяг волокон матеріалу. Стан деформації об'ємний, стан напружень плоский, при цьому відбувається зменшення товщини стінки по трапеції від центрального радіуса деформації до зовнішнього радіуса.

У зоні *IV* відбувається стиск волокон матеріалу, стан деформації об'ємний, стан напружень плоский, при цьому відбувається збільшення товщини стінки по трапеції від нейтрального радіуса деформації до внутрішнього радіуса.

Традиційно для аналізу процесів гнуття використовують полярну систему координат із центром у точці *O*. Оскільки процес деформації проходить у гарячому стані, зміцнення матеріалу не враховуємо.

Рівняння рівноваги для всіх зон деформацій буде таким [1]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0, \quad (1)$$

Рівняння пластичності для зон *I, II, III* згідно з [1] запишемо так:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = \pm \beta \sigma_s. \quad (2)$$

Знак “-” відноситься до зон *I, III*, знак “+” – до зони *II*. Для зон *I, II* $\nu=1,15$; для зони *III* $\nu=1$.

Рівняння пластичності для зони *IV* буде таким:

$$\sigma_\theta = -\sigma_s. \quad (3)$$

При сумісному розв'язку рівняння рівноваги (1) і рівняння пластичності (2) знаходимо радіальні напруження.

У зоні *I* для граничних умов $\sigma_\rho = 0$, при $c=r_3$.

$$\sigma_{\rho 1} = -\beta \sigma_s \ln\left(\frac{r_3}{\rho}\right). \quad (4)$$

У зоні *II* для граничних умов $\sigma_\rho = -\sigma_\kappa$, при $c=r$.

$$\sigma_{\rho 2} = -\left(\sigma_s \ln\left(\frac{\rho}{r}\right) + \sigma_\kappa\right). \quad (5)$$

У зоні *III* для граничних умов $\sigma_\rho = -\beta \sigma_s \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)$, при $c=r_2$.

$$\sigma_{\rho 3} = -\beta \sigma_s \ln\left(\frac{r_3}{\rho}\right). \quad (6)$$

Для зони *IV* проводимо сумісний розв'язок рівнянь (1) та (3).

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho + \sigma_s = 0. \quad (7)$$

Проводячи елементарні перетворення, отримаємо

$$\int \frac{d\sigma_\rho}{-\sigma_\rho - \sigma_s} = \int \frac{d\rho}{\rho} + c. \quad (8)$$

Сталу інтегрування c знаходимо з граничних умов: при $\rho = r_1$

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) - \sigma_\kappa, \text{ тоді}$$

$$c = -\ln\left(\sigma_s \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) + \sigma_\kappa - \sigma_s\right) - \ln(r_1). \quad (9)$$

Підставляючи значення рівняння (9) у рівняння (8) після перетворень і скорочень, отримаємо формулу для визначення контактних напружень і в IV зоні

$$\sigma_{\rho 4} = \frac{-\sigma_s \left(\rho + r_1 \left(\ln \left(\frac{r_1}{r} \right) - 1 \right) + \sigma_k r_1 \right)}{\rho}. \quad (10)$$

Для того, щоб знайти нейтральний радіус соленоїда r_n , проводимо сумісний розв'язок системи рівнянь (6) і (11).

Оскільки аналітичний розв'язок даної системи є неможливим, нейтральний радіус напружень знаходимо числовим методом, використовуючи ЕОМ.

Величину контактних напружень знаходимо за виразом

$$\sigma_k = \frac{N}{B \cdot r}. \quad (11)$$

Момент від поздовжньої сили

$$M_N = N \frac{r_3 + r}{2}. \quad (12)$$

Зусилля згину труби роликком знаходимо за виразом

$$P = \frac{M_\sigma}{K_m (l + \mu_p \cdot r_3)}. \quad (13)$$

Особливу увагу слід приділити зміні товщини стінок труби заготовки під час навивання. Оскільки стінки труби на зовнішньому і внутрішньому радіусах піддаються плоскому стану деформації, з умови збереження об'єму запишемо

$$S_0 dl_0 = \frac{d\varphi}{2} (2r_2 S_1 + S_1^2), \quad (14)$$

$$d\varphi = \frac{\lambda}{r_2} dl_0. \quad (15)$$

Відносне видовження матеріалу знаходимо за виразом

$$\lambda = \frac{r_2}{r_n}. \quad (16)$$

Тоді, враховуючи значення формули (15) і (16), отримаємо

$$d\varphi = \frac{dl_0}{r_n}. \quad (17)$$

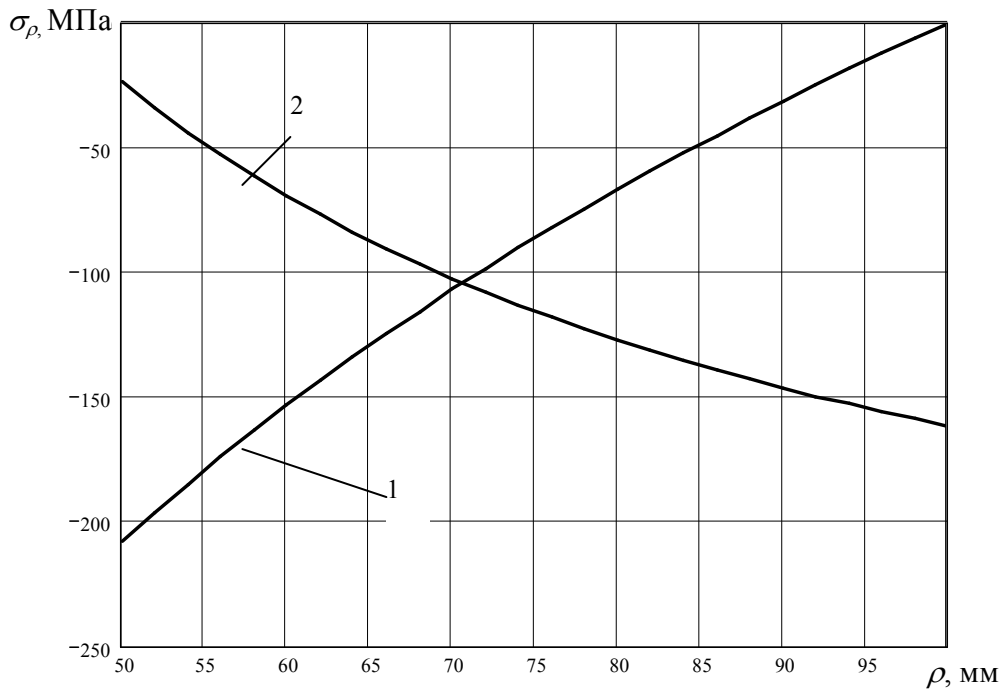
Підставляючи значення формули (17) у вираз (14), отримаємо

$$2r_2 S_1 + S_1^2 - 2S_0 r_n = 0. \quad (18)$$

Звідси знаходимо товщину стінки на зовнішньому радіусі

$$S_2 = -r + \sqrt{2S_0 r_n + r^2}. \quad (19)$$

На рис. 3 наведено графічні залежності радіальних напружень у зоні стиску і в зоні розтягування соленоїдів при їх навиванні з трубчастого прокату прямокутного поперечного профілю з наступними числовими параметрами.



($y_s=300\text{МПа}$; $y_k=20\text{МПа}$; $r=50\text{мм}$; $r_l=55\text{мм}$; $r_2=95\text{мм}$; $r_3=100\text{мм}$; $r_n=70,64\text{мм}$)

Рисунок 3. Графічне визначення нейтрального радіуса напружень під час навівання соленоїда:

- 1 – графік залежності радіальних напружень у зоні стиску;
- 2 – графік залежності радіальних напружень у зоні розтягу

З графіка бачимо як змінюються радіальні напруження в зоні розтягу і стиску з труби прямокутного поперечного січення, а точка перетину визначає нейтральний радіус напружень ($r_n=70,64\text{мм}$).

На рис. 4 наведено залежності моментів тангенціальних напружень від внутрішнього радіуса навівання соленоїда з трубчастих заготовок прямокутного поперечного січення.

Як бачимо з графіків при навіванні труб прямокутного поперечного січення зі збільшенням радіуса соленоїда момент зменшується.

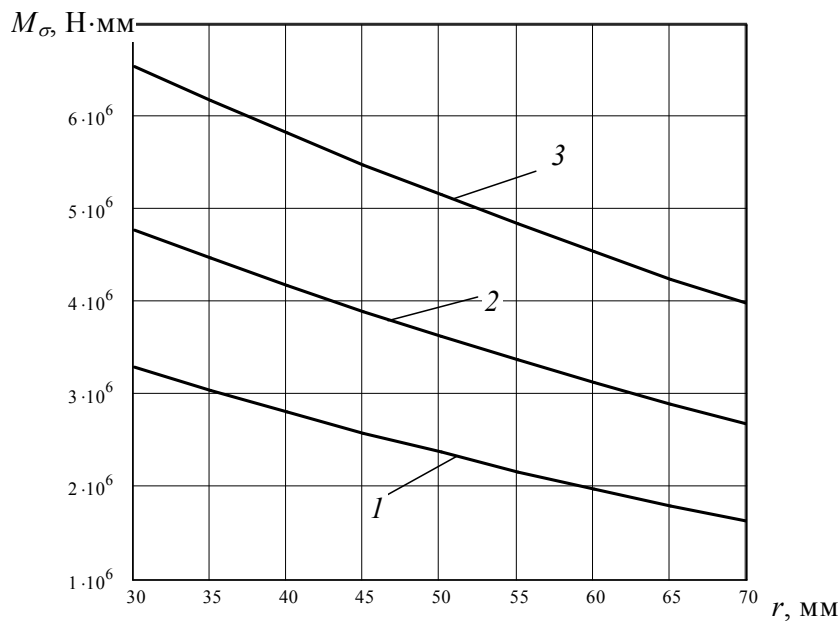


Рисунок 4. Графік залежності моменту тангенціальних напружень від внутрішнього радіуса навівання соленоїда:

- 1 – $r_2=100\text{мм}$, $r_3=105\text{мм}$; 2 – $r_2=120\text{мм}$, $r_3=125\text{мм}$; 3 – $r_2=140\text{мм}$, $r_3=145\text{мм}$

Для вальцювання гвинтових профільних елементів спроектовано спеціальний пристрій (рис.4). Пристрій виконано у вигляді оправи 1, на якій встановлено диски 2 з центральними отворами 3 і шпонковим пазом 4 під шпонку 5 з можливістю осьового переміщення. По зовнішньому діаметру диски утворюють бочкоподібну або іншої форми криву 6 з переходом на два кінці з іншими діаметрами 7, а з правого кінця оправа 1 підтиснена заднім центром 8.

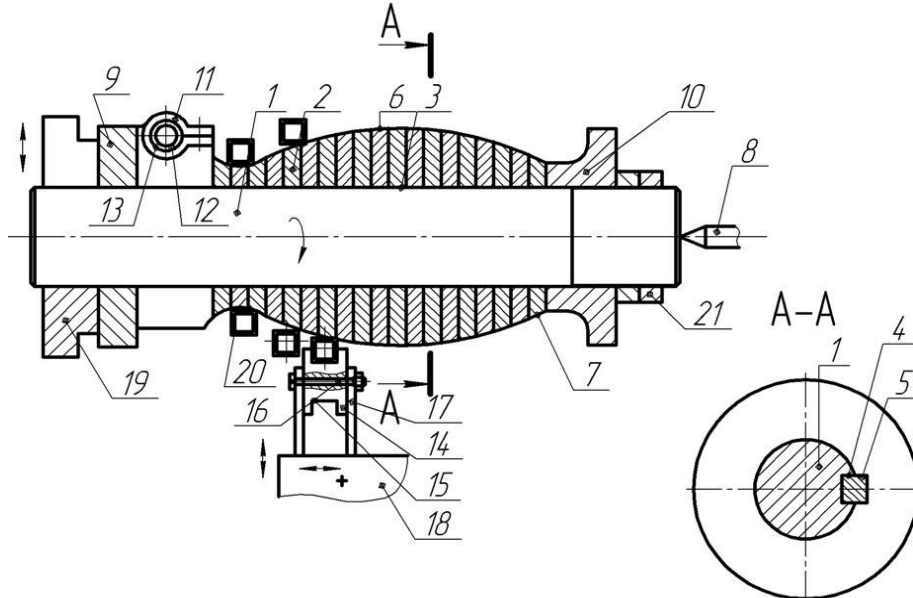


Рисунок 5. Пристрій для навивання профільних гвинтових елементів [5]

Крім цього, на оправі з двох кінців жорстко встановлено опорні втулки – ліва 9 і права 10, а до лівої опори жорстко прикріплено хомут 11 відомої конструкції з внутрішнім діаметром 12, меншим від зовнішнього діаметра труби 13 (заготовки) з можливістю регулювання його величини. Хомут внутрішнім діаметром жорстко затискає кінець труби (заготовки), а по зовнішньому діаметру труба взаємодіє з притискним роликом 14, на зовнішньому діаметрі якого виконано півкруглу канавку 15 радіусом, який дорівнює зовнішньому діаметру труби (заготовки) з можливістю кругового провертання.

Притискний ролик жорстко закріплено на осі 16, яка, в свою чергу, жорстко закріплена на кронштейні 17, який другим кінцем жорстко закріплений на супорті 18 токарного верстата й взаємодіє з копиром відомої конструкції з можливістю осьового та радіального переміщення. Привід оправи 1 пристрою здійснюється від токарного патрона 19.

Робота пристрою здійснюється так. Оправу лівим кінцем жорстко кріплять у патрон токарного верстата, кінець труби (заготовки) 13 – до хомута 11, вільний правий кінець оправи підтискають заднім центром 8, після чого вмикається привід верстата й оправа з дисками 2 здійснює 1–2 оберти. При цьому на диски 2 здійснюється процес навивання витків 20 труби (заготовки). Після цього верстат зупиняють і до витка труби підводиться притискний ролик 14 з кронштейном 17, які настроюють на певне зусилля притиску копіювання профілю 6 і заданий крок навивання через копир або інший відомий пристрій.

Після завершення технологічного процесу навивання верстат зупиняють, притискний ролик з кронштейном і супортом 18 відводять у вихідне положення, кінець труби 13 звільняють від хомута і відводять задній центр, а праву опору 10 знімають з оправи разом з дисками, які через проміжок між витками гвинтових елементів витягують їх з середини.

Форму та розміри гвинтових профільних елементів можна змінювати, змінюючи при цьому профіль дисків 2 і копіювального механізму.

Висновки. Виведено аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану при виготовленні гвинтових соленоїдів із труб прямокутного поперечного січення. Виведено також аналітичні залежності для визначення граничних напружень у зоні згину соленоїдів, зміни товщини стінок заготовок, зміни нейтрального радіуса згину і залежність моментів тангенціальних напружень від величини внутрішнього радіуса соленоїда.

Література

1. Зубцов М.Е. Листовая штамповка / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432с.
2. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков / Б.М. Гевко. – Львов: Выща школа, 1986. – 128с.
3. Мошнин Е.М. Гибка и правка на ротационных машинах / Е.М. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1977. – 209с.
4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А.Попов. – М.: Машиностроение, 1980. –432с.
5. Пат. 44468 Україна, МПК В12D 11/06. Пристрій для виготовлення профільних гвинтових елементів / Палюх А.Я., Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Івасечко Р.Р., Гупка А.Б.; заявники і власники патенту Палюх А.Я., Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Івасечко Р.Р., Гупка А.Б. – №u200902594; заявл. 23.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл.№ 19. – 4 с.
6. Жолобов О.О. Технологія автоматизованого виробництва / О.О. Жолобов, В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський. – Житомир: Сяйво, 2008. – 1014 с.
7. Гевко Б.М., Пилипець М.І. Технологічні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок / Б.М.Гевко, М.І. Пилипець. – Тернопіль: вид-во ТДТУ, 2009. – 455с.

Отримано 25.11.2010