

А.Є. Дячун, к.т.н., доц.

Т.Д. Навроцька, аспір.

Р.М. Котик, аспір.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

М.І. Клендій, асист.

ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут»

## Дослідження силових параметрів формоутворення гвинтових елементів різного профілю

*При формуванні гвинтових профільних елементів, радіуси гнуття заготовок є змінними протягом одного оберту оправки складного профілю. Виведено рівняння радіуса кривизни профілю оправки і аналітичні залежності для визначення крутних моментів і значення напружень в різних зонах, а також залежності радіусів кривизни і зусилля навивання в залежності від конструктивних і технологічних параметрів робочих органів і сільськогосподарських машин. Розроблена методика визначення впливу радіуса кривизни оправки, а вплив конструктивних і технологічних параметрів на величину крутного моменту. Виведені аналітичні залежності впливу радіуса кривизни складного профілю оправки на величину крутного моменту і кута повороту оправки. Розроблена конструкція пристрою для навивання гвинтових заготовок різнопрофільних, яка захищена патентом України на корисну модель.*

**Ключові слова:** профіль; навивання; гвинтова спіраль.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемами розробки і дослідження технологічних процесів виготовлення різнопрофільних гвинтових робочих органів присвячені праці вчених Гевко Б.М. [1], Аверкієв Ю.А. [2], Герман Х. [3], Григор'єв А.М. [4], Груздев І.Е. [5], Рогатинського Р.М. [6], Гевко Ів.Б. [7], Пилипець М.І. [8], Гевко І.Б. [9], Бронштейн М.М. [10] та багатьох інших. Однак цілий ряд питань пов'язаних з проектуванням і виготовленням різнопрофільних гвинтових заготовок і відповідно гвинтових робочих органів потребують свого вирішення.

**Постановка проблеми.** Механізми з гвинтовими пристроями (МГП) отримали широке використання у всіх галузях народного господарства завдяки концентрації різних операцій у поєднанні з транспортування. Домінуючими факторами, які впливають на формування конструктивних параметрів гвинтових механізмів, є технологія їх виготовлення. Різноманітність способів виготовлення ускладнює процес їх виготовлення і вимагає вивчення кожного із них на зміну конструктивних параметрів гвинтових стрічок.

Тому вирішення наукової проблеми проектування і виготовлення гвинтових робочих органів сільськогосподарських машин, що відповідає сучасним вимогам за продуктивністю, матеріало- та енергоємністю з високими техніко-економічними можливостями.

Серед гвинтових робочих органів важливе місце займають гвинтові різнопрофільні гвинтові елементи, які широко використовуються в багатьох конструкціях транспортно-технологічних механізмах, таких як змішувачі, подрібнювачі, затискні пристрої, гвинтові сепаратори, очисники смужки та інші в агропромисловому комплексі.

Розглянемо процес навивання стрічки на оправу складного профілю в поперечному перерізі, що заданий в параметричному виді  $x=x(\theta)$ ,  $y=y(\theta)$ , розрахункова схема якого представлено на рисунку 1, де  $\theta$  - кутовий параметр, що визначає кут повороту оправки, рад.

В процесі навивання відбувається стиснення волокон стрічки на внутрішньому діаметрі і розтяг волокон стрічки на зовнішньому діаметрі гвинтового профільного елемента. Визначимо момент згину стрічки в цих зонах, розглянувши процес деформації стрічки в гарячому та холодному стані.

Як відомо, радіальні напруження, що виникають у зоні розтягу ребра стрічки визначаються за формулою [1]:

$$\sigma_{\rho 1} = -\beta \sigma_s \cdot \ln \frac{R}{\rho}, \quad (1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує вплив середнього головного напруження, дорівнює 1,15;

$\sigma_s$  – границя текучості матеріалу профільного гвинтового елемента, МПа;

$R$  – зовнішній радіус гнуття, мм;

$\rho$  - полярна координата радіуса гнуття, мм.

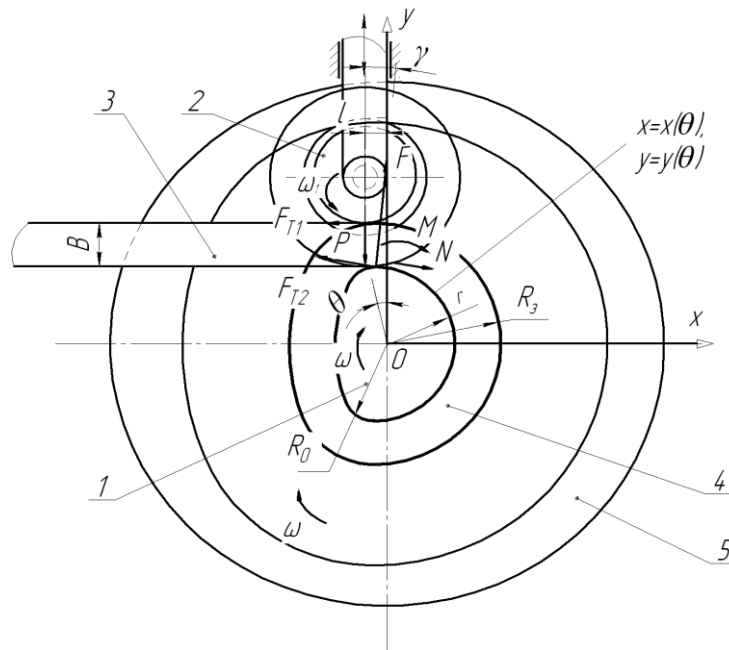


Рис. 1. Розрахункова схема процесу навивання стрічки на оправу складного профілю: 1 – оправу складного профілю; 2 – притисний ролик; 3 – стрічка; 4 – профільний гвинтовий елемент; 5 – торцевий кулачок, форма якого відповідає еквідистанті оправу 1

Аналогічно визначаємо радіальні напруження в зоні стиску[1]:

$$\sigma_{\rho 2} = -\beta \sigma_s \cdot \ln \frac{\rho}{r}, \quad (2)$$

де  $r$  – внутрішній радіус гнuttя, мм.

Тангенціальні напруження в зоні розтягу:

$$\sigma = \beta \sigma_s \cdot \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right). \quad (3)$$

Тангенціальні напруження в зоні стиску:

$$\sigma_{\theta 2} = -\beta \sigma_s \cdot \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r} \right). \quad (4)$$

Особливістю навивання профільних гвинтових елементів є те, що радіуси кривизни, а відповідно і радіуси гнuttя стрічки є змінними протягом одного оберту оправу складного профілю. Тому внутрішній радіус гнuttя заготовки  $r$  можна визначити на основі рівняння радіуса кривизни профілю оправу [2] за формулою:

$$r = \frac{(\dot{x} + \dot{y})}{\ddot{x}\dot{y} - \dot{x}\ddot{y}}. \quad (5)$$

Відповідно зовнішній радіус  $R$  гнuttя стрічки можна визначити за формулою:

$$R = r + \beta_y B, \quad (6)$$

де  $\beta_y$  – коефіцієнт усадки стрічки під час навивання,

$B$  – ширина ребра стрічки, мм.

Момент гнuttя стрічки визначаємо за формулою:

$$M_1 = \left( \int_{\rho_n}^R \sigma_{\theta 1} \rho d\rho + \int_r^{\rho_n} \sigma_{\theta 2} \rho d\rho \right) H, \quad (7)$$

де  $\rho_n$  – радіус нейтральної поверхні напружень, мм;

$H$  – товщина ребра профільної стрічки, мм.

Радіус нейтральної поверхні напружень визначаємо за формулою[1]:

$$\rho_n = \sqrt{Rr}. \quad (8)$$

Підставляючи формули (3), (4) у формулу (7), враховуючи формулу (8) знаходимо:

$$M_1 = \beta \sigma_s \frac{H \beta_y^2 B^2}{4}. \quad (9)$$

У випадку навивання стрічки на оправу складного профілю в холодному стані відбувається зміцнення матеріалу стрічки, причому величини тангенціальних напружень для стрічки визначаються за формулами [1]:

- в зоні розтягу:

$$\sigma_{01} = \beta \left[ \sigma_{T0} \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right) + \frac{\Pi}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho}{\rho_n} - \ln \frac{\rho R}{\rho_n^2} \ln \frac{R}{\rho} \right) \right]; \quad (10)$$

- в зоні стиску:

$$\sigma_{02} = -\beta \left[ \sigma_{T0} \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r} \right) + \frac{\Pi}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho_n}{\rho} + \ln \frac{\rho_n^2}{\rho r} \ln \frac{\rho}{r} \right) \right], \quad (11)$$

де  $\sigma_{T,0}$  - екстрапольована границя текучості матеріалу стрічки, МПа;

$\Pi$  - лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки, МПа.

Підставляючи рівняння (10), (11) у рівняння (7) після інтегрування та скорочень знаходимо момент гнуття стрічки:

$$M_1 = \beta H \left[ \sigma_{T0} \frac{\beta_y^2 B^2}{4} + \Pi \left( \frac{2r^2 + 2r\beta_y B + \beta_y^2 B^2}{4} \cdot \ln \sqrt{1 + \frac{\beta_y B}{r}} - \frac{2r\beta_y B + \beta_y^2 B^2}{8} \right) \right]. \quad (12)$$

На основі формул (12) та (5) робимо висновок, що в процесі навивання стрічки на оправу складного профілю в холодному стані відбувається зміна моменту гнуття стрічки від кута повороту оправы. Згідно розрахункової схеми на рис. 1 рівняння рівноваги частини стрічки, що піддається деформації запишемо наступним чином [4]:

$$\left. \begin{aligned} \text{по осі } x: & -F_{T1} - F_{T2} \cdot \cos \gamma + N \cdot \cos \gamma + F \cdot \sin \gamma = 0; \\ \text{по осі } y: & -P + F_{T2} \cdot \sin \gamma - N \cdot \sin \gamma + F \cdot \cos \gamma = 0; \\ \text{сума моментів: } & P \cdot l + F_{T1} \cdot R_3 + F_{T2} \cdot R_0 - N \cdot \rho_n - M = 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

де  $F_{T1}$  - сила тертя між роликком та стрічкою, Н;

$F_{T2}$  - сила тертя між стрічкою та оправою складного профілю, Н;

$\gamma$  - кут тиску оправы складного профілю, град;

$N$  - поздовжня сила, Н;

$F$  - рівнодіюча нормальних контактних напружень на стрічці, Н;

$P$  - сила гнуття притискним роликком, Н;

$l$  - відстань між центрами оправы складного профілю та притискного ролика, мм;

$R_3$  - зовнішній радіус взаємодії гвинтового елемента відносно центра обертання оправы, мм;

$R_0$  - відстань від центра обертання оправы до її поверхні, мм.

Сили тертя визначаємо за залежностями:

$$F_{T1} = \mu_1 \cdot P \quad (14)$$

$$F_{T2} = \mu_2 \cdot F, \quad (15)$$

де  $\mu_1$  - коефіцієнт тертя між притискним роликком та стрічкою;

$\mu_2$  - коефіцієнт тертя між оправою та гвинтовим елементом.

Рівнодіючу нормальних контактних напружень знаходимо за формулою:

$$F = \sigma_r \cdot H \cdot L, \quad (16)$$

де  $\sigma_r$  - контактні нормальні напруження на внутрішньому радіусу гвинтового елемента, МПа;

$L$  - довжина контакту по внутрішньому діаметру гвинтового елемента, мм.

При відомому моменті гнуття  $M$  можна знайти усі сили, що виникають в процесі навивання, розв'язавши систему рівнянь (13). В даному випадку:

$$F = \frac{-P \cdot (\mu \cdot \operatorname{tg} \gamma - 1)}{\mu \cdot \sin \gamma + \operatorname{tg} \gamma \cdot (-\mu \cdot \cos \gamma + \sin \gamma) + \cos \gamma}; \quad (17)$$

$$N = \frac{\mu_1 \cdot P + F \cdot (\mu_2 \cdot \cos \gamma + \sin \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (18)$$

Експериментальні дослідження показали, що максимальна сила гнuttя  $P$  притискним роликом виникає на початковій стадії деформування, тобто, коли кут  $\gamma$  рівний нулю. Тому, для спрощення розрахунків, розв'язок системи рівнянь (13) буде наступним:

$$P = F ; \quad (19)$$

$$N = (\mu_1 + \mu_2) \cdot P ; \quad (20)$$

$$P = \frac{M}{l + \mu_1 R_3 + \mu_2 R_0} . \quad (21)$$

Відстань від центра обертання оправу до її поверхні визначаємо за формулою:

$$R = \sqrt{x(\theta) + y(\theta)} . \quad (22)$$

Зовнішній радіус взаємодії гвинтового елемента відносно центра обертання оправу визначаємо за формулою [4]:

$$R_3 = \sqrt{(x(\theta) + B)^2 + (y(\theta) + B)^2} . \quad (23)$$

Слід зауважити, що тут коефіцієнт тертя  $\mu_1$  між притискним роликом і стрічкою є величиною приведеною і не відповідає безпосередньому значенню коефіцієнта тертя для контактуючих матеріалів. Момент, який необхідно прикласти для обертання оправу складного профілю, залежить від конструктивних особливостей оправ і в загальному випадку визначається згідно рисунка 1 за залежністю:

$$M_0 = k_M \cdot P \cdot (l + \mu_1 \cdot R_3) . \quad (24)$$

де  $k_M$  – коефіцієнт, що враховує конструктивні виконання оправу.

На основі приведених вище формул можна проектувати необхідне технологічне оснащення. При цьому, для зменшення моменту обертання оправу, а отже, і зменшення необхідної потужності навивання гвинтових заготовок, потрібно звести до мінімуму коефіцієнт тертя  $\mu_1$ , наприклад, використовуючи змащувальні речовини.

Як приклад розрахунку розглянемо процес навивання стрічки на оправку складного профілю (рис. 1), рівняння якого задано в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x(\theta) &= (R_1 - d) \cos \theta + d \cos^2 \theta, \\ y(\theta) &= R_1 \sin \theta, \end{aligned} \quad (25)$$

де  $R_1$  – максимальний радіус оправу складного профілю, мм;

$d$  – параметр, що визначає відхилення профілю оправу, мм.

Гвинтові елементи заданого вище профілю можуть використовуватись для змішування матеріалів спареними шнеками.

Для параметричного рівняння (25) встановлюємо наступні залежності:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -(R - d) \sin \theta - 2d \cos \theta \sin \theta; \\ \dot{y} &= R \cos \theta; \\ \ddot{x} &= -(R - d) \cos \theta + 2d(\sin \theta - \cos \theta); \\ \ddot{y} &= -R \sin \theta. \end{aligned} \quad (26)$$

Підставляючи рівняння (26) у рівняння (5), одержуємо:

$$r = \frac{\left[ \left( (-R + d) \sin \theta - 2d \cos \theta \sin \theta \right) + R \cos \theta \right]}{\left( (-R + d) \sin \theta - 2d \cos \theta \sin \theta \right) (-R \sin \theta) - \left( (-R + d) \cos \theta + 2d(\sin \theta - \cos \theta) \right) R \cos \theta} . \quad (27)$$

Рівняння (27) підставляємо в залежності (12), (21) та (24) та одержуємо результати силових параметрів формування гвинтових елементів складного профілю, що заданий параметричним рівнянням (25).

Розрахунки виведених залежностей виконували за допомогою пакету прикладних програм для ПК. За результатами розрахунків побудовано графіки залежності радіуса кривизни складного профілю оправу від кутового параметру (рис. 2) та залежності зусилля гнuttя і крутного моменту від кута повороту оправу складного профілю (рис. 3, 4).

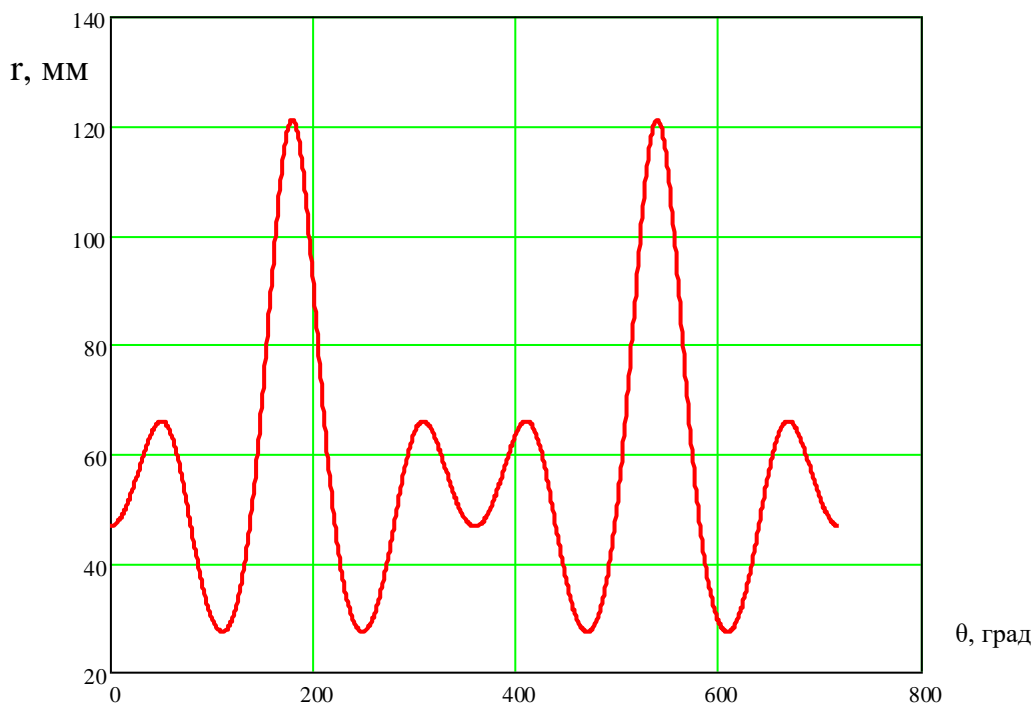


Рис. 2. Графіки залежності радіуса кривизни складного профілю оправки від кутового параметру  
 $R_1 = 50\text{мм}$ ;  $d = 15\text{мм}$

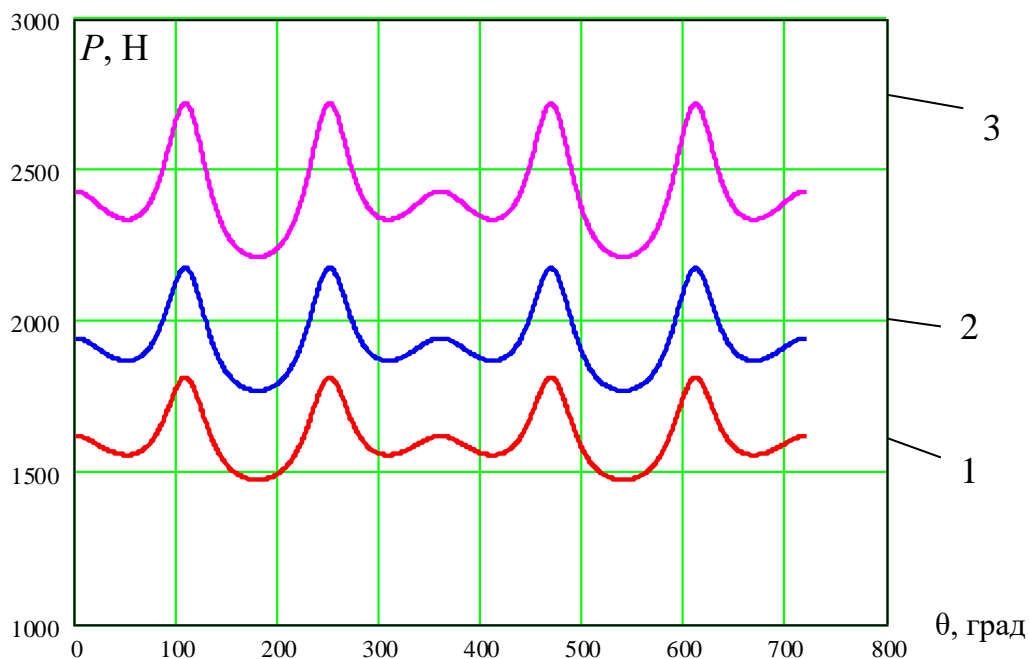


Рис. 3. Графіки залежності сили гнуття притискним роликком від кута повороту оправки складного профілю (Ст 3,  $\sigma_e = 440\text{МПа}$ )  $B = 15\text{мм}$ ;  $R_1 = 50\text{мм}$ ;  $d = 15\text{мм}$ : 1 –  $H = 1\text{мм}$ ; 2 –  $H = 1,2\text{мм}$ ; 3 –  $H = 1,5\text{мм}$

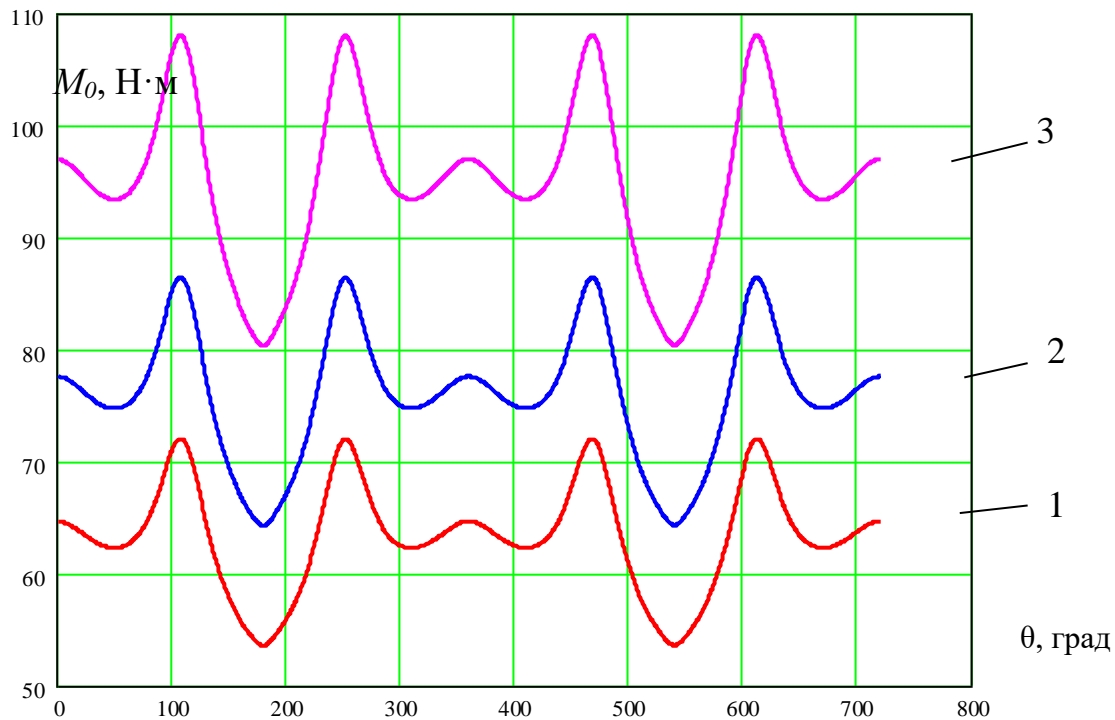


Рис. 4. Графіки залежності моменту, який необхідно прикласти для обертання оправи складного профілю від кута повороту оправи (Ст 3,  $\sigma_s=440\text{МПа}$ )  $B=15\text{мм}$ ;  $R_1=50\text{мм}$ ;  $d=15\text{мм}$ : 1 –  $H=1\text{мм}$ ; 2 –  $H=1,2\text{мм}$ ; 3 –  $H=1,5\text{мм}$

З графічних залежностей рис. 2, 3 видно що при товщині стрічки  $H = 1\text{ мм}$ , сила гнуття профільної стрічки притискним роликком знаходиться в межах  $P = 1500 - 1800\text{ Н}$ , а момент, який необхідно прикласти для обертання оправи  $M_0 = 55 - 72\text{ Н}\cdot\text{м}$ , при  $H=1,5\text{мм}$  сила гнуття знаходиться в межах  $P = 2200 - 2700\text{ Н}$ , а момент  $M_0 = 80 - 108\text{ Н}\cdot\text{м}$ . Зусилля і момент формоутворення набувають максимального значення в процесі формування заготовки на частині оправи із найменшим радіусом кривизни, тобто в даному випадку при 105 та 250 градусах, найменші значення досягаються при 180 градусах, коли радіус гнуття є найбільшим. Ці параметри повторюються періодично із періодом  $2\pi$ .

На основі проведених досліджень можна зробити наступні **висновки**:

Розроблена методика визначення впливу радіуса кривизни оправки, а вплив конструктивних і технологічних параметрів на величину крутного моменту;

Виведені аналітичні залежності впливу радіуса кривизни складного профілю оправки на величину крутного моменту і кута повороту оправки;

Розроблена конструкція пристрою для навивання гвинтових заготовок різнопрофільних, яка захищена патентом України на корисну модель.

#### Список використаної літератури:

1. Гевко Б.М. Технологічні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок деталей машин / Б.М. Гевко, М.І. Пилипець, В.В. Васильків, Д.Л. Радик. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2009. – 457 с.
2. Аверкиев Ю.А. Характер формоизменения и силовые условия при гибке полосы на ребро / Ю.А. Аверкиев // Вестник машиностроения. – 1981. – № 1. – С. 64–66.
3. Герман Х. Шнековые машины в технологи ФГР / Х.Герман. – Л., 1975. – 180 с.
4. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1972. – 184 с.
5. Груздев И.Э. Теория шнековых устройств / И.Э. Груздев, В.Г. Мирзоев, В.И. Янков. – Л., 1987.
6. Рогатинський Р.М. Модель конструювання гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями / Р.М. Рогатинський, І.Б. Гевко // ТНТУ. – 2012. – № 3. – С. 197–210.
7. Исследование силовых параметров формообразования профильных винтовых элементов / И.Гевко, И.Кучвара, А.Дячун, А.Гупка // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Lublin : Rzeszow, 2015. – Vol. 17, No. 7. – Pp. 111–116.
8. Пилипець М.І. Науково-технічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин : автореф. ... докт. дисерт. / М.І. Пилипець. – Львів, 2002. – 35 с.
9. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 720 с.

10. Пат. 118403 Україна. Універсальний пристрій для виготовлення гвинтових заготовок різного профілю / А.Є. Дячун, Т.Д. Навроцька та інші. – 2017.

**References:**

1. Gevko, B.M., Pylypec', M.I., Vasylykiv, V.V. and Radyk, D.L. (2009), *Tehnologichni osnovy formoutvorennja riznoprofil'nyh gvyntovyh zagotovyk detalej mashyn*, TDTU imeni Ivana Puljuja, Ternopil', 457 p.
2. Averkiev, Ju.A. (1981), «Harakter formoizmenenija i silovye uslovija pri gibke polosy na rebro», *Vestnik mashinostroenija*, No. 1, pp. 64–66.
3. German, H. (1975), *Shnekovye mashiny v tehnologi FGR*, Leningrad, 180 p.
4. Grigor'ev, A.M. (1972), *Vintovye konvejery*, Mashinostroenie, Moskva, 184 p.
5. Gruzdev, I.Je., Mirzoev, V.G. and Jankov, V.I. (1987), *Teorija shnekovyh ustrojstv*, Leningrad, 1987.
6. Rogatyns'kyj, R.M. and Gevko, I.B. (2012), «Model' konstrujuvannja gvyntovyh konvejeriv z rozshyrenymy tehnologichnymy mozhlyvostjamy», *TNTU*, No. 3, pp. 197–210.
7. Gevko, I., Kuchvara, I., Djachun, A. and Gupka, A. (2015), «Issledovanie silovyh parametrov formoobrazovanija profil'nyh vintovyh jelementov», *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, Vol. 17, No. 7, Lublin, Rzeszow, pp. 111–116.
8. Pylypec', M.I. (2002), *Naukovo-tehnichni osnovy vyrobnyctva navyvnyh zagotovyk detalej mashyn*, Abstract of the dissertation, L'viv, 35 p.
9. Bronshtejn, I.N. and Semendjaev, K.A. (1981), *Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vuzov*, Nauka, Moskva, 720 p.
10. Djachun, A.Je., Navroc'ka, T.D. and others (2017), *Universal'nyj prystrij dlja vygotovlennja gvyntovyh zagotovyk riznogo profilju* [Universal device for making screw billets of various profiles], State Register of Patents of Ukraine, Kyi'v, UA, Pat. 118403.

**Дячун Андрій Євгенович** – кандидат технічних наук, доцент технології машинобудування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування.

E-mail: dyachun\_andriy@ukr.net.

**Навроцька Тетяна Дем'янівна** – аспірант кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– надійність і довговічність деталей машин.

E-mail: kaf\_am@ukr.net.

**Котик Роман Михайлович** – аспірант кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– надійність і довговічність деталей машин.

E-mail: kaf\_am@ukr.net.

**Клендій Марія Іванівна** – асистент ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут».

Наукові інтереси:

– надійність і довговічність деталей машин.

E-mail: vova221@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2017.