

**ПРО ОЦІНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ НА ДУЗІ КОВЗАННЯ**

Работа посвящена расширению сферы применения техники Л. Прандтля на решение задачи о взаимодействии конвейерной ленты и нефутерованного барабана. Получено решение задачи Ламе с соответствующими граничными условиями, что позволило выяснить характер деформаций на дуге скольжения. Приведены графики деформаций и соответствующих им напряжений.

**ON CONVEYER'S BELT STRESS-STRAIN STATE IN SLIDING ARCH
DRUM**

The paper is devoted to expand L. Prandtl technique to contact the conveyor belt with rigid drum. The Lamb task solving with corresponding boundary condition allow explaining the deflection nature in slide arch drum. The deflections and corresponding stresses graphics are demonstrated.

Одним з найбільш ефективних шляхів збільшення тягової спроможності приводу стрічкового конвеєра є підвищення коефіцієнту тертя конвеєрної стрічки з поверхнею барабана, тобто його футеровка [1].

На сьогодні практичного метода розрахунку еластичної футеровки не розроблено. Розробка наукових основ проектування футеровки приводних барабанів стрічкових конвеєрів та практичних рекомендацій конструктору потребує розв'язку наступних задач: а) поглиблене дослідження процесу взаємодії еластичної футеровки з пружною стрічкою та уточнення фізичних закономірностей; б) встановлення раціональної форми контактуючих поверхонь та визначення оптимальних значень геометричних параметрів захисного шару футеровки.

Дослідженням у напрямі вивчення процесів взаємодії стрічки з футерованим барабаном присвячено праці багатьох авторів [1–6]. Так, О.В. Андрєєв [2], користуючись методами фотопружності, підтвердив існування як дуги ковзання, так і покою, а також підтвердив передачу зусиль останньою. Факт передачі зусиль він пояснював депланацією поперечних перетинів стрічки під дією сил розтягу.

Значний внесок у вивчення процесів взаємодії стрічки з футерованим барабаном зроблено науковою школою під керівництвом академіка НАН України В. І Моссаковського [3, 4]. Так, в [3] футерований барабан моделювався основою Вінклера. В роботі [4] для врахування деформаційних характеристик футеровки основу Вінклера було замінено більш складною основою – Власова-Ціммермана. Однак, як з'ясувалось, у обох випадках при прямованні жорсткості футеровки барабана до нескінченності, що відповідає гладкому барабану, виникає ковзання стрічки по барабану. Крім того, таке рішення приводило до появи стрибків напружень і деформацій, існування яких пояснити важко.

В дослідженнях, що виконуються в ІГТМ НАН України, не тільки експериментально підтверджено факт передачі тягових зусиль на дузі спокою [5], а й зроблено припущення про існування крайового шару в зоні контакту, який відіграє вирішальну значення у передачі зусиль, врахування якого дозволяє усунути стрибки напружень і деформацій [6].

Так, в роботі [6] вирішено задачу про передачу зусиль від футерованого барабана до стрічки з врахуванням наявності крайового шару в ній. Задачу вирі-

шено в напруженнях за наявності змішаних граничних умов. Використання техніки Л. Прандтля [7] до врахування існуючого крайового шару дозволило суттєво спростити задачу і усунути стрибки напружень і деформацій, і вперше, як на нашу думку, отримати розв'язок у замкнутому вигляді. Аналіз отриманого розв'язку дозволив не тільки підтвердити передачу тягових зусиль на дузі спокую, але й пояснити її механізм.

Успішне застосування техніки калібровочних функцій Л. Прандтля [7] до спрощення диференціальних рівнянь задачі з крайовим шаром надихнуло авторів і надало впевненості до розв'язання задачі про сумісне деформування футерованого барабана і конвеєрної стрічки у переміщеннях.

Спрощення рівнянь Ламе і їх розв'язок з відповідними граничними умовами дозволить враховувати як конструктивні параметри, так і механічні характеристики матеріалів взаємодіючих тіл.

Постановка задачі. Пружна та гнучка стрічка (рис. 1) огинає на куті охопту α покритий футеровкою жорсткий барабан. Радіус барабана R вважається набагато більшим товщини шару футеровки H і стрічки h , тобто $h/R \ll 1$ і $H/R \ll 1$. Деформації вздовж напрямних циліндричного барабана вважаємо малими, тобто такими, що ними можна знехтувати. Кут охопту барабана стрічкою ділиться на ділянку прилягання – дугу покою $\varphi \in (0, \varphi^*)$ і ділянку ковзання $\varphi \in (\varphi^*, \alpha)$. Барабан обертається у напрямку годинникової стрілки зі сталою кутовою швидкістю. Відлік кутів ведеться від точки набігання $\varphi = 0$.

Система координат для відліку радіальних u та окружних деформацій v має початок у точці $\varphi=0$ і зв'язана з тілом барабана. Для опрацювання техніки отримання розв'язку розглядається задача про взаємодію стрічки з жорстким барабаном, тобто $H=0$.

Задача полягає у спрощенні та отриманні розв'язку рівнянь рівноваги у переміщеннях, записаних у циліндричних координатах (рівняння Ламе) для плоского випадку:

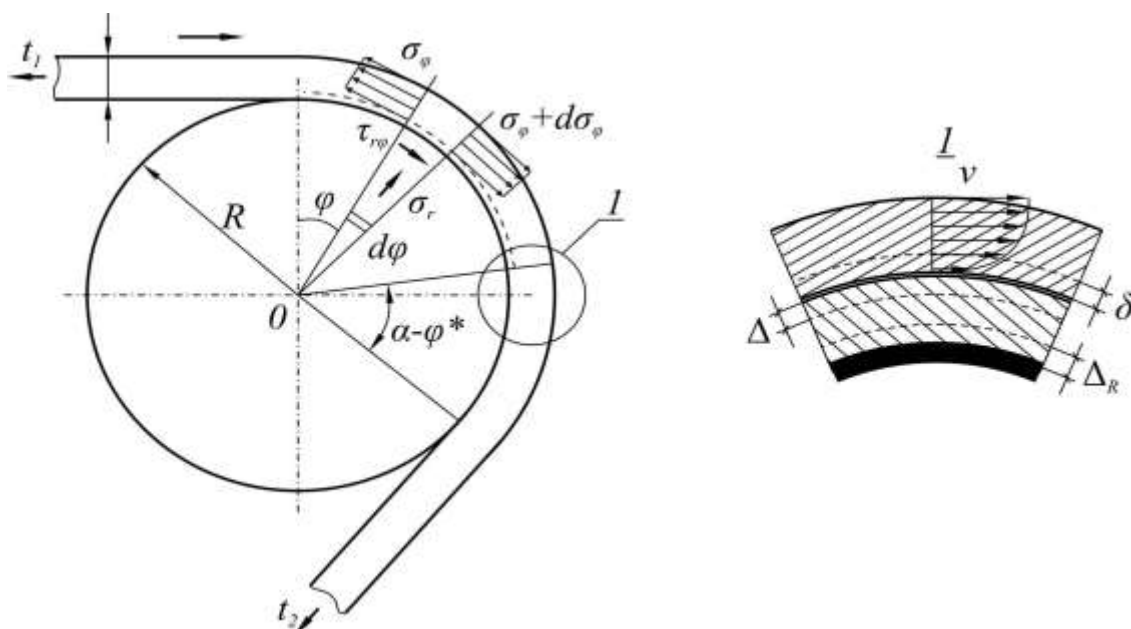


Рис.1 – Розрахункова схема задачі

$$\begin{aligned}
(\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - \mu \left(\frac{u}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + \mu \Delta u &= 0; \\
(\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{r \partial \varphi} - \mu \left(\frac{v}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) + \mu \Delta v &= 0,
\end{aligned}
\tag{1}$$

де $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi}$; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$, λ та μ - пружні константи в рівнянні Ламе з граничними умовами:

$$\begin{aligned}
u &= 0 \text{ при } r = R, \\
\sigma_r &= 0, \tau_{r\varphi} = 0 \text{ при } r = R+h, \\
\int_R^{R+h} \sigma_\varphi \partial r &= t_1; \int_R^{R+h} \sigma_\varphi \partial r = t_2 \text{ при } \varphi = 0 \text{ і } \varphi = \alpha, \\
v &= 0 \text{ при } \varphi = 0, r = R.
\end{aligned}$$

Після оцінки складових системи рівнянь (1) відносно товщини конвеєрної стрічки з врахуванням малості її по відношенню до радіуса приводного барабана $h/R \ll 1$ отримаємо:

$$\begin{aligned}
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (\lambda + \mu) \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \varphi} &= 0; \\
\mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) &= 0.
\end{aligned}
\tag{2}$$

Виконаємо оцінку виразів для напружень для шару товщиною h , для якого виконується умова $h/R \ll 1$.

Відомо, що [2]:

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}; \\
\sigma_{\varphi r} &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + 2\mu \left(\frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right); \\
\tau_{r\varphi} &= \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r} \right).
\end{aligned}
\tag{3}$$

Після оцінки складових системи (3) відносно товщини конвеєрної стрічки з врахуванням малості її по відношенню до радіуса приводного барабана $h/R \ll 1$ отримаємо:

$$\sigma_r = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \sigma_\varphi = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + 2\mu \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi}; \quad \tau_{r\varphi} = \mu \frac{\partial v}{\partial r}.$$

Запишемо систему рівнянь рівноваги (2) у вигляді:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (\lambda + \mu) \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \varphi} = 0; \quad (4)$$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) = 0. \quad (5)$$

Проінтегруємо рівняння (5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} &= 0; \\ \frac{\partial v}{\partial r} = z \Rightarrow \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r} z &= 0; \quad \frac{\partial z}{\partial r} = -\frac{1}{r} z; \quad \int \frac{\partial z}{z} = -\int \frac{\partial r}{r}; \quad \ln z = -\ln r + \ln C_1(\varphi); \\ \ln z = \ln \frac{C_1(\varphi)}{r}; \quad z &= \frac{C_1(\varphi)}{r}; \\ \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{C_1(\varphi)}{r}; \quad v = C_1(\varphi) \int \frac{\partial r}{r} &\Rightarrow v = C_1(\varphi) \ln r + C_2(\varphi); \\ v = C_1(\varphi) \ln r + C_2(\varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

де $C_1(\varphi), C_2(\varphi)$ - довільні функції інтегрування.

Після нескладних перетворень будемо мати:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \varphi \partial r} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right); \quad \frac{\partial v}{\partial r} = C_1(\varphi) \frac{1}{r}; \quad \frac{\partial C_1(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{1}{r} = \frac{C_1'(\varphi)}{r} \Rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi \partial r} = \frac{C_1'(\varphi)}{r}.$$

Тоді рівняння (4) набуде вигляду:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} C_1'(\varphi) = 0. \quad (7)$$

Вирішивши рівняння (12) відносно $C_1'(\varphi)$, отримаємо:

$$C_1(\varphi) = -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \int \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} r^2 \partial \varphi. \quad (8)$$

Отримати рішення (8) у більш простій формі можна, коли виконується умова:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{D_1(\varphi)}{r^2}. \quad (9)$$

Тоді можна записати

$$C_1(\varphi) = -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \int D_1(\varphi) \partial\varphi.$$

Поклавши $D_1^*(\varphi) = \int D_1(\varphi) \partial\varphi$, отримаємо:

$$C_1(\varphi) = -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1^*(\varphi).$$

Тоді будемо мати:

$$v = -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1^*(\varphi) \ln r + C_2(\varphi). \quad (10)$$

З виразу (9) інтегруванням отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} &= \frac{D_1(\varphi)}{r^2}; \\ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} &= \frac{D_1(\varphi)}{r^2}; \quad \frac{\partial u}{\partial r} = D_1(\varphi) \int \frac{\partial r}{r^2} = -D_1(\varphi) \frac{1}{r} + D_2(\varphi); \quad u = \int \left(-D_1(\varphi) \frac{1}{r} + D_2(\varphi) \right) \partial r; \\ u &= -D_1(\varphi) \ln r + D_2(\varphi)r + D_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким чином, остаточно маємо:

$$\begin{aligned} u &= D_1(\varphi) \ln r + D_2(\varphi)r + D_3; \\ v &= -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1^*(\varphi) \ln r + C_2(\varphi). \end{aligned} \quad (12)$$

Задовольнимо граничній умові $u = 0$ при $r = R$.

$$\begin{aligned} u &= -D_1(\varphi) \ln R + D_2(\varphi)R + D_3 = 0 \Rightarrow D_3 = D_1(\varphi) \ln R - D_2(\varphi)R; \\ u &= D_1(\varphi) \ln \frac{R}{r} + D_2(\varphi)(r - R). \end{aligned}$$

Вираз (12) при цьому набуде вигляду:

$$\begin{aligned} u &= D_1(\varphi) \ln \frac{R}{r} + D_2(\varphi)(r - R); \\ v &= -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1^*(\varphi) \ln r + C_2(\varphi). \end{aligned} \quad (13)$$

Задовольнимо граничній умові $\sigma_r = 0$ при $r = R + h$. Враховуючи (3), (13) та

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{-D_2(\varphi)}{r} + D_2(\varphi); \quad \frac{\partial v}{\partial \varphi} = -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1(\varphi) \ln r + C_2'(\varphi), \text{ отримаємо:}$$

$$-(\gamma + 2\mu) \left(\frac{D_2(\varphi)}{R+h} + D_2(\varphi) \right) + \frac{\lambda}{R+h} \left(-\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1(\varphi) \ln(R+h) + C_2'(\varphi) \right) = 0;$$

$$C_2'(\varphi) = D_1(\varphi) \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda} + \frac{\lambda(\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} \ln(R+h) \right) - \frac{(R+h)(\lambda + 2\mu)}{\lambda} D_2(\varphi).$$

Після інтегрування будемо мати:

$$C_2(\varphi) = (\lambda + 2\mu) \left(D_1^*(\varphi) \left(\frac{\lambda + \mu + \lambda^2 \ln(R+h)}{\lambda(\lambda + \mu)} \right) - D_2^*(\varphi) \frac{(R+h)}{\lambda} \right),$$

де $D_2^*(\varphi) = \int D_2(\varphi) \partial \varphi$.

Тоді вираз (13) запишеться у вигляді:

$$u = D_1(\varphi) \ln \frac{R}{r} + D_2(\varphi)(r - R);$$

$$v = -\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1^*(\varphi) \ln r + (\lambda + 2\mu) \left(D_1^*(\varphi) \left(\frac{\lambda + \mu + \lambda^2 \ln(R+h)}{\lambda(\lambda + \mu)} \right) - D_2^*(\varphi) \frac{(R+h)}{\lambda} \right). \quad (14)$$

Задовольнимо граничній умові $\tau_{r\varphi} = 0$ при $r=R+h$:

$$\tau_{r\varphi} = -\mu \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} D_1^*(\varphi) \frac{1}{(R+h)} = 0.$$

Оскільки:

$$D_1^*(\varphi) = \int D_1(\varphi) \partial \varphi = 0 \Rightarrow D_1(\varphi) = 0,$$

вираз (14) набуде вигляду:

$$u = D_2(\varphi)(r - R);$$

$$v = -\frac{(\lambda + 2\mu)(R+h)}{\lambda} D_2^*(\varphi). \quad (15)$$

Задовольнимо граничній умові $\varphi=0$ и $\varphi=\alpha$:

$$\int_R^{R+h} \sigma_\varphi \partial r = t_1; \quad \int_R^{R+h} \sigma_\varphi \partial r = t_2. \quad (16)$$

Вираз для напружень σ_φ матиме вид: $\sigma_\varphi = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + 2\mu \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi}$.

Частинні похідні для його визначення набувають вигляду:

$$\frac{\partial v}{\partial \varphi} = -\frac{(\lambda + 2\mu)(R+h)}{\lambda} D_2(\varphi); \dots \frac{\partial u}{\partial r} = D_2(\varphi).$$

Тоді

$$\sigma_\varphi = -\frac{\lambda + 2\mu}{r} \left(\frac{(\lambda + 2\mu)(R+h)}{\lambda} D_2(\varphi) \right) + \lambda D_2(\varphi). \quad (17)$$

Тоді перша гранична умова (16) з урахуванням (17) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} -(\lambda + 2\mu) \int_R^{R+h} \left(\frac{(\lambda + 2\mu)(R+h)}{r\lambda} D_2(0) \right) \partial r + \lambda \int_R^{R+h} D_2(0) \partial r = \\ = \frac{(\lambda + 2\mu)^2 (R+h)}{\lambda} D_2(0) \int_R^{R+h} \frac{\partial r}{r} + \lambda D_2(0) h = t_1. \end{aligned}$$

Враховуючи, що:

$$\int_R^{R+h} \frac{\partial r}{r} = \ln r \Big|_R^{R+h} = \ln(R+h) - \ln(R) = \ln\left(\frac{R+h}{R}\right) = \ln\left(1 + \frac{h}{R}\right) = \ln(1) = 0,$$

отримаємо:

$$\lambda D_2(0) h = t_1; \lambda D_2(\varphi^*) h = t_2;$$

$$D_2(0) = \frac{t_1}{\lambda h}; D_2(\varphi^*) = \frac{t_2}{\lambda h}.$$

У першому наближенні приймемо функцію $D_2(\varphi)$ лінійною:

$$D_2(\varphi) = D_2(0) + \frac{D_2(\varphi^*) - D_2(0)}{\varphi^*} \varphi = D_2(\varphi) = \frac{t_1}{\lambda h} + \frac{(t_2 - t_1)\varphi}{\lambda h \varphi^*}. \quad (18)$$

Тоді розв'язок (15) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} u &= \left(\frac{t_1}{\lambda h} + \frac{(t_2 - t_1)\varphi}{\lambda h \varphi^*} \right) (r - R); \\ v &= -\frac{(\lambda + 2\mu)(R+h)}{\lambda} \left(\frac{t_1 \varphi}{\lambda h} + \frac{(t_2 - t_1)\varphi^2}{2\lambda h \varphi^*} + D_3 \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Для визначення сталої інтегрування D_3 задовольнимо умові: $v = 0$ при $\varphi = 0, r = R$:

$$v = -\frac{(\lambda + 2\mu)(R + h)}{\lambda} \left(\frac{t_1\varphi}{\lambda h} + \frac{(t_2 - t_1)\varphi^2}{2\lambda h\varphi^*} + D_3 \right) = 0 \Rightarrow D_3 = 0.$$

Розв'язок (19) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} u &= \left(\frac{t_1}{\lambda h} + \frac{(t_2 - t_1)\varphi}{\lambda h\varphi^*} \right) (r - R); \\ v &= -\frac{(\lambda + 2\mu)(R + h)}{\lambda} \left(\frac{t_1\varphi}{\lambda h} + \frac{(t_2 - t_1)\varphi^2}{2\lambda h\varphi^*} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Перевірка показала, що розв'язок (20) задовольняє і рівнянням рівноваги і граничним умовам (1).

Вирази для напружень з урахуванням малості товщини стрічки $h/R \ll 1$ і отриманого розв'язку (20) матимуть вид:

$$\sigma_r = -\frac{(\lambda + 2\mu)}{\lambda h\varphi^*} (t_2\varphi - t_1(\varphi - \varphi^*)) \left(1 - \frac{R + h}{r} \right); \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi &= \left(\lambda - \frac{(\lambda + 2\mu)^2 (R + h)}{\lambda r} \right) \cdot \frac{(t_2\varphi - t_1(\varphi - \varphi^*))}{\lambda h\varphi^*}; \\ \tau_{r\varphi} &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Дотичні напруження за умов пружного деформування на дузі ковзання відсутні.

Графіки отримані за наступних вихідних даних: $E_n = 1,2 \cdot 10^6$ Па – модуль пружності матеріалу стрічки; $\nu = 0,4$ – коефіцієнт Пуассона; $R = 0,25$ м – радіус приводного барабана; $h = 0,0134$ м товщина стрічки; $t_1 = 20000$ та $t_2 = 5000$ Н – зусилля у набігаючий та збігаючий гілках стрічки відповідно; $r = R + h$ – координата шару, для якого отримані напруження (26), (27); $\alpha = \pi$ – кут охоплення барабана стрічкою; $\varphi^* = 0,7\pi$ – межа дуги спокою.

На рисунках 2–5 представлено параметри напружено-деформованого стану конвеєрної стрічки на дузі пружного ковзання, отриманих розв'язком задачі (1) в переміщеннях.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Використання техніки Л. Прандтля до спрощення рівнянь Ламе підтвердило свою ефективність дозволивши отримати розв'язок задачі в аналітичному виді.
2. Залежність окружних переміщень тільки від кута φ вказує на відсутність дотичних напружень на дузі ковзання.
3. Знання закону розподілу окружних переміщень на дузі ковзання дозволить виявити природу зношення не футерованих барабанів стрічкових конвеєрів та розробити засоби їх зниження.

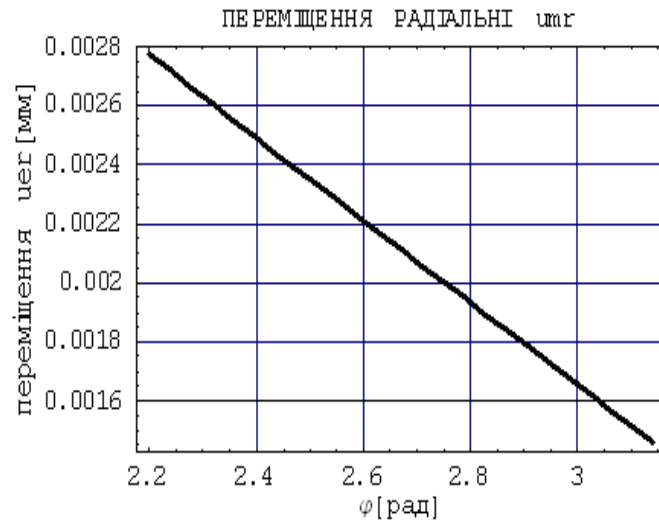


Рис. 2 – Переміщення радіальні

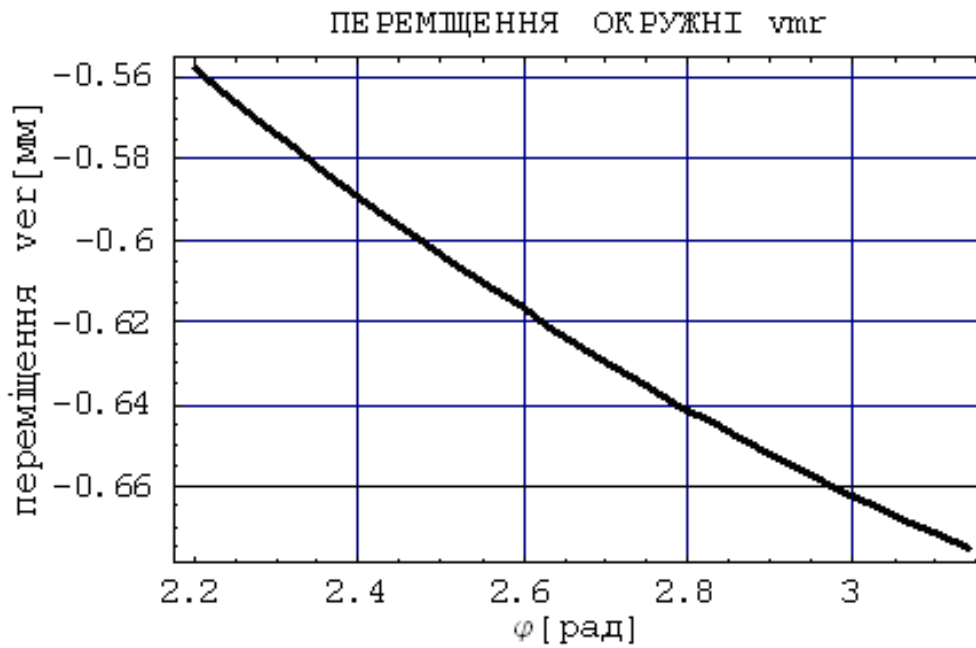


Рис. 3 – Переміщення окружні

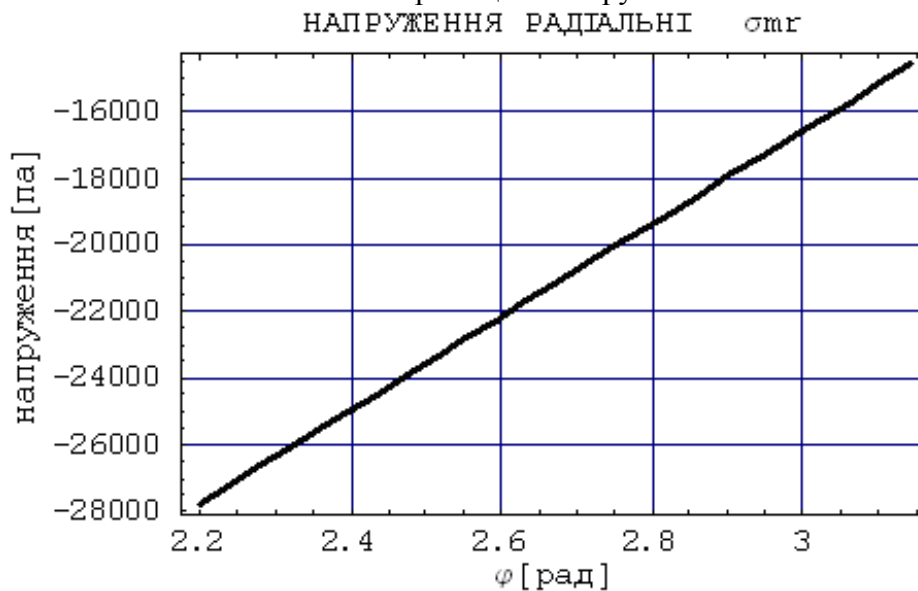


Рис. 4 – Радіальні напруження

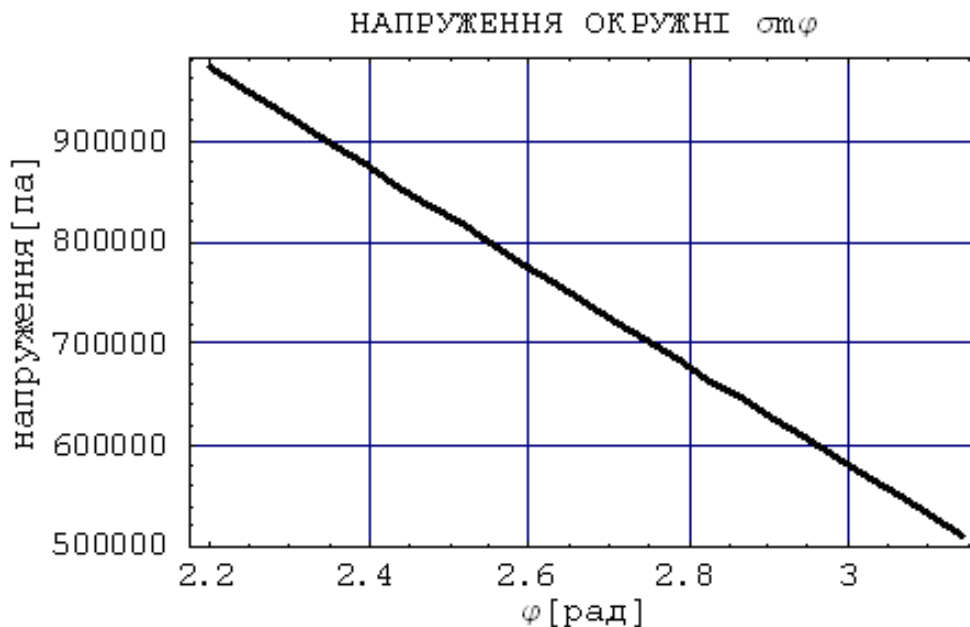


Рис. 5 – Окружні напруження

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прочность и долговечность горных машин // Украинский заочный политехнический институт. – 1979. – Вып. 5. – М.: Недра, 303 с.
2. Андреев А. В. Некоторые вопросы физики работы ленточного конвейера / А. В. Андреев // Горные машины и автоматика. (Расчет, конструирование, испытания, насадка). – М.: Недра, 1967. – С. 224–240.
3. Моссаковский В. И. Исследование взаимодействия ленты и упругой футеровки / В. И. Моссаковский, Г. З. Рудяков, В. Б. Салитренник // Горная механика и машиностроение: Межвед. сб. науч. тр. – М.: Недра, 1967 – Т.18 – С. 320–329.
4. Взаимодействие гибкой конвейерной ленты с одномерно упругой футеровкой барабана / В. И. Моссаковский, В. В. Петров, В. Б. Салитренник, А. Г. Гриневский // Прикладная механика. – 1977. – Т.8, №7. – С. 90–95.
5. Кирия Р. В. Экспериментальные исследования взаимодействия упругой ленты с барабаном конвейера / Р. В. Кирия, Е. А. Стаховский // Науковий вісник Національної гірничої академії України: Зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2000. – №5. – С. 24–26.
6. Кирия Р. В. Применение метода возмущений Л. Прандтля к разрешению парадокса Н. Е. Жуковского / Р. В. Кирия, Е. А. Стаховский // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2002. – Випуск 4(21). – С. 33–46.
7. Найфэ А. Х. Методы возмущений / А. Х. Найфэ. – М.: Мир, 1976. – 455 с.

УДК 678.061:678.676

Канд. техн. наук С.Н. Зыбайло
(ГВУЗ УГХТУ)

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ТРИИЗОЦИАНАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ КРЕПЛЕНИЯ РЕЗИН К МЕТАЛУ В ПРОЦЕССЕ ВУЛКАНИЗАЦИИ

В роботі розраховані термодинамічні характеристики триізоціанатів та оцінено вплив їх будови на міцність кріплення гум до металу в процесі вулканізації клеями на їх основі. Рекомендовано використовувати олігомерні триізоціанати на основі 2,4-толуїлендіізоціанату та олігомерних триолів як продукти клейового призначення

INFLUENCE OF CHEMICAL STRUCTURE TRIIZOCIANATS ON DURABILITY OF BONDING RUBBERS TO METAL IN THE PROCESS OF VULCANIZATION

In-process calculated thermodynamics values triizocianats and influence of their structure is appraised on durability of bonding rubbers to metal in process of vulcanization by glues on their basis.

It is made to order to utilize oligomeric triisocyanates on the basis of 2,4-TDI and oligomeric triols as products of the glue setting

Изоцианаты характеризуются высокой способностью к образованию адгезионных соединений с субстратами различной химической природы. В клеевых композициях используют преимущественно продукты, которые содержат три изоцианатные группы, участвующие в образовании межфазных связей [1]. В СНГ наиболее распространенным промышленным продуктом для этих целей был клей «Лейконат» – 20 мас. % раствор в дихлорэтаноле 4,4',4"-трифенилметантриизоцианата [2]. В связи с запретом использования легко летучих веществ озоноразрушающего действия, к которым относится и дихлорэтан, клей «Лейконат» в России снят с производства.

В странах европейского союза в качестве клеев горячего отверждения и адгезионных добавок широко используют триизоцианаты Десмодур (фирма «Байер», Германия [3]), представляющие собой растворы индивидуальных триизоцианатов в этилацетате, термодинамические характеристики которых (табл. 1) были рассчитаны по методу атомных инкрементов [4-6] с использованием данных молекулярного дизайна [7].

В соответствии с расчетными данными, представленными в табл. 1, замена атома углерода на атом фосфора (трис-(п-изоцианатофенил)-тиофосфат) не обеспечивает повышение поверхностной энергии.

В настоящее время для повышения термодинамических и адгезионных характеристик синтезируют олигомерные триизоцианаты, представляющие собой продукты взаимодействия диизоцианатов и олигомерных триолов. Например, аддукт 2,4-толуилендиизоцианата и триметилпропана (аддукт ТДИ-ТМП) характеризуется более высокой поверхностной энергией в сравнении с N,N',N"-трифенилметантриизоцианатом и трис-(п-изоцианатофенил)-тиофосфатом, что и обуславливает его более широкое применение в качестве продукта клеевого назначения.

Аналогичный эффект достигается при тримеризации 2,4-толуилендиизоцианата с образованием соответствующего триизоцианурата, при этом его поверхностная энергия возрастает до 67,63 мДж/м². Однако свойства полученных триизоциануратов определяются соотношением узлов и гибких цепей [8], что и будет влиять на свойства клеевых композиций на их основе.

Триизоцианаты одинаковой функциональности, но различной химической структуры имеют отличные значения поверхностной энергии (табл. 1), что соответственно влияет на адгезионные характеристики клеев на их основе [9].

Таблица 1 - Термодинамические характеристики промышленных триизоцианатов

Химическая формула	Ван-дер-ваальсовый объем, Å ³	Эффективная мольная энергия когезии, Дж/моль	Параметр растворимости δ, (МДж/м ³) ^{1/2}	Поверхностная энергия γ, мДж/м ²
1	2	3	4	5