

Тришевський О.І.

Харківський національний технічний
університет сільського господарства
імені П.Василенко
м. Харків, Україна
E-mail: 3shev@ukr.net

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ ПЛОСКОГО БІЧНОГО ЕЛЕМЕНТУ ПРИ ВА-
ЛКОВІЙ ФОРМОВЦІ ПРОФІЛІВ З ПОДОВЖНИМИ
ПЕРІОДИЧНИМИ ГОФРАМИ ЖОРСТКОСТІ**

УДК 621.771.63

У роботі виконаний теоретичний аналіз напружено-деформованого стану плоского бічного елемента при валковій формовці профілів з подовжніми гофрами, що періодично повторюються. З використанням отриманих залежностей визначені параметри напружено-деформованого стану плоского бічного елемента бічної обшивки залізничного піввагона. Аналіз отриманих даних дозволив виявити дві характерні зони осередку деформації, в одній з яких внаслідок формування виникають залишкові напруження стискування, які при певних поєднаннях механічних властивостей матеріалу і геометричних розмірів профілю можуть викликати пластичну втрату стійкості плоского бічного елемента.

Ключові слова: гнуті профілі, періодичні гофри, плоский бічний елемент, напружено-деформований стан, швидкості деформації, деформації, дотичні напруження, залишкові напруження.

Вступ, актуальність і постановка проблеми.

Одним з найширше використовуваних в машинобудуванні видів конструкційних матеріалів є гнуті профілі прокату. До числа найбільш ефективних різновидів гнутих профілів, освоєних в промисловості відносно нещодавно, відносяться листові профілі з гофрами, що періодично повторюються, із подовжньою або поперечною орієнтацією (Рис.1) [1].

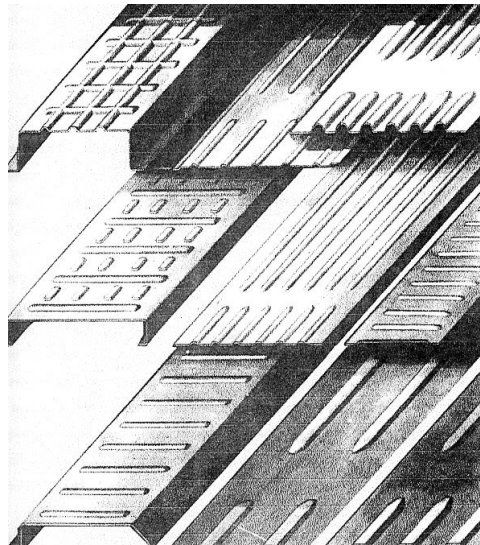


Рис.1 Види гнутих профілів з гофрами різної орієнтації, що періодично повторюються

Досвід освоєння і виробництва нових типів профілів з гофрами, що періодично повторюються, показав, що одним з найбільш характерних дефектів при їх виготовленні є виникнення хвилястості на плоскому бічному елементі у гофрів, розташованих у кромках профілів [2]. Цей дефект може виникати внаслідок складного перерозподілу деформацій

і залишкових напружень у осередку формоутворення крайнього гофра і на плоскій, прилеглий до нього ділянці профілю. [3]. Для відвертання можливості виникнення хвилястості, яка утрудняє використання подібних профілів при складанні машин і конструкцій, потрібно :

- 1) проаналізувати напружено-деформований стан металу у осередку деформації і прилеглий плоскій ділянці;
- 2) встановити причини, що викликають пластичну втрату стійкості;
- 3) на підставі цього підготувати рекомендації по вибору оптимального співвідношення розмірів елементів профілів і параметрів технологічного процесу, що забезпечують отримання якісної готової продукції.

Метою цієї роботи є визначення причин хвилеутворення на плоских бічних ділянках профілів з подовжніми гофрами, що періодично повторюються, на основі аналізу їх напружено-деформованого стану методом механіки суцільних середовищ з використанням поля швидкостей переміщень.

Основні результати досліджень

В якості початкових в методі механіки суцільних середовищ з використанням полів швидкостей переміщень були прийняті наступні допущення:

- 1) поперечні перерізи в процесі деформації залишаються плоскими і перпендикулярними осі профілювання (гіпотеза плоских перерізів);
- 2) шари елемента, що деформується, не роблять тиски один на одного;
- 3) товщина елемента залишається незмінною;
- 4) формована смуга рухається з постійною швидкістю.

Відповідно до першого допущення скористаємося прямокутною системою координат.

У даному випадку у осередку деформації (Рис. 2) відбувається плавна зміна висоти гофра, що формується, від нуля до кінцевої в роз'ємі валків. Оскільки гофри, розташовані у кромках профілю, формуються в результаті не лише місцевого витягу, але і (частково) переміщення металу плоского бічного елемента у осередок деформації, утяжка цього елемента також починається до осьової площини валків - в тому ж перерізі, що і осередок деформації.

Припустимо, що утяжка відбувається в основному в результаті поперечного зрушення волокон елемента в зону формування гофрів.

Зміна утяжки у будь-якому поперечному перерізі на відстані z від начала осередку деформації, що має довжину L , залежно від максимального зрушення δ_{max} у напрямі осі Ox і функції зміни поперечного зрушення

$$f(z) = A \frac{z^6}{L^6} + B \frac{z^5}{L^5} + C \frac{z^4}{L^4} + D \frac{z^3}{L^3}$$

можна описати таким чином:

$$\delta(z) = \delta_{max} \left(A \frac{z^6}{L^6} + B \frac{z^5}{L^5} + C \frac{z^4}{L^4} + D \frac{z^3}{L^3} \right) \quad (1)$$

Коефіцієнти A, B, C, D визначимо, враховуючи наступне:

- 1) у кінці осередку деформації (при $z = L$) зрушення у напрямі осі Ox є максимальним, тобто $\delta(z) = \delta_{max}$, і відповідно до (1)

$$A + B + C + D = 1; \quad (2)$$

2) при $z = L$ переміщення у напрямі осі Ox припиняється, тобто функція набуває постійного значення. Отже, перша похідна $f'(z)$ у кінці осередку деформації перетворюється на нуль:

$$1/L(6A + 5B + 4C + 3D) = 0.$$

звідки

$$6A + 5B + 4C + 3D = 0; \quad (3)$$

3) оскільки у кінці осередку деформації (при $z = L$), $f'(z) = 0$, то $f''(z) = 0$, тобто

$$\frac{1}{L^2}(30A + 20B + 12C + 6D) = 0;$$

звідси

$$15A + 10B + 6C + 3D = 0 \quad (4)$$

4) деякій точці $z = kL$ відповідає перегин на графіці функції $f(z)$, отже, друга похідна для цієї точки перетворюється на нуль:

$$\frac{1}{L^2}(30Ak^4 + 20Bk^3 + 12Ck^2 + 6Dk) = 0,$$

звідки

$$15Ak^3 + 10Bk^2 + 6Ck + 3D = 0. \quad (5)$$

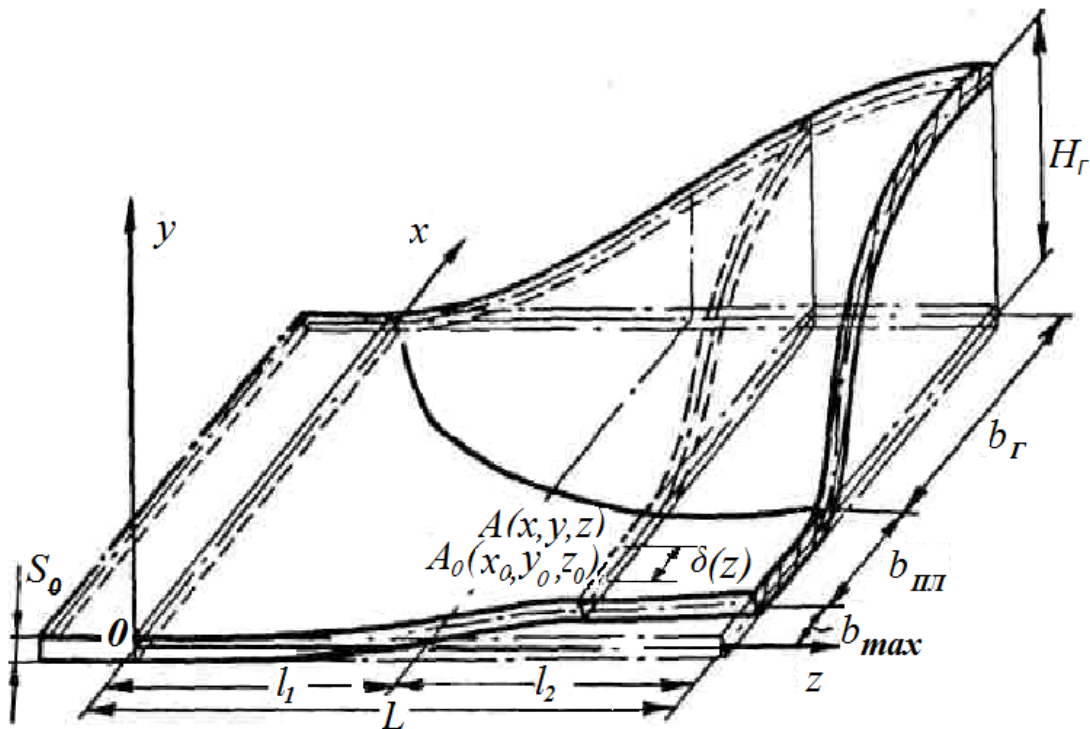


Рис.2 Схема осередку деформації при формоутворенні профілів з подовжніми гофрами

Вирішуючи систему рівнянь (2) – (5), знаходимо:

$$A = 10 - D; \quad B = -3(8 - D); \quad C = 3(5 - D);$$

$$D = \frac{50k^3 - 80k^2 + 30k}{5k^3 - 10k^2 + 6k - 1}. \quad (6)$$

Поточні координати довільно вибраної точки $A(x, y, z)$ (див. рис. 2) пов'язані з початковими координатами $A_0(x_0, y_0, z_0)$ залежностями:

$$x = x_0 + \delta(z);$$

$$y = y_0;$$

$$z = vnt \quad (7)$$

Відповідно до (1), (7) поле швидкостей переміщень має вигляд

$$v_x = \frac{dx}{dt} = v_n \delta_{max} \left(6A \frac{z^5}{L^6} + 5B \frac{z^4}{L^5} + 4C \frac{z^3}{L^4} + 3D \frac{z^2}{L^3} \right);$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = 0;$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = 0. \quad (8)$$

Виходячи з (8), визначимо швидкості деформацій:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = 0;$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} = v_n \delta_{max} \left(30A \frac{z^4}{L^6} + 20B \frac{z^3}{L^5} + 12C \frac{z^2}{L^4} + 6D \frac{z}{L^3} \right) \quad (9)$$

Інтенсивність швидкостей деформацій:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)} =$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{3} v_n \delta_{max} \left| 30A \frac{z^4}{L^6} + 20B \frac{z^3}{L^5} + 12C \frac{z^2}{L^4} + 6D \frac{z}{L^3} \right| \quad (10)$$

Деформації можна визначити по формулах:

$$e_{xx} = \int_0^t \varepsilon_{xx} dt = 0; \quad e_{xy} = \int_0^t \varepsilon_{xy} dt = 0; \quad e_{yy} = \int_0^t \varepsilon_{yy} dt = 0;$$

$$e_{xz} = \int_0^t \varepsilon_{xz} dt = \delta_{max} \left(6A \frac{z^5}{L^6} + 5B \frac{z^4}{L^5} + 4C \frac{z^3}{L^4} + 3D \frac{z^2}{L^3} \right);$$

$$e_{zz} = \int_0^t \varepsilon_{zz} dt = 0; \quad e_{yz} = \int_0^t \varepsilon_{yz} dt = 0; \quad (11)$$

Інтенсивність деформацій:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{yy} - e_{zz})^2 + (e_{xx} - e_{zz})^2 + \frac{3}{2}(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{xz}^2)} =$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{3} \delta_{max} \left(6A \frac{z^4}{L^6} + 5B \frac{z^3}{L^5} + 4C \frac{z^2}{L^4} + 3D \frac{z}{L^3} \right). \quad (12)$$

Подовжня відносна деформація елемента

$$e = \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} - 1 = \sqrt{1 + \left[\frac{d\delta(z)}{dz}\right]^2} - 1. \quad (13)$$

Розкладаючи (13) в ряд Тейлора і обмежуючись двома першими членами, з обліком (1) отримаємо:

$$e = \frac{\delta_{max}^2}{2} \left(6A \frac{z^5}{L^6} + 5B \frac{z^4}{L^5} + 4C \frac{z^3}{L^4} + 3D \frac{z^2}{L^3} \right)^2. \quad (14)$$

Для металу, що зміцнюється, зв'язок між інтенсивністю напружень і інтенсивністю деформацій визначається таким чином:

$$\sigma_i = K e_i^m = K \left[\frac{\sqrt{3}}{3} \delta_{max} \left(6A \frac{z^4}{L^6} + 5B \frac{z^3}{L^5} + 4C \frac{z^2}{L^4} + 3D \frac{z}{L^3} \right) \right]^m, \quad (15)$$

де K і m – коефіцієнти статичної функції, що характеризує зміцнення металу під час деформації.

Коефіцієнт жорсткості

$$\mu_i = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = K \frac{\delta_{max}^{m-1}}{\sqrt{3}^{m+1}} \frac{\left(6A \frac{z^5}{L^6} + 5B \frac{z^4}{L^5} + 4C \frac{z^3}{L^4} + 3D \frac{z^2}{L^3} \right)^m}{\left| 30A \frac{z^4}{L^6} + 20B \frac{z^3}{L^5} + 12C \frac{z^2}{L^4} + 6D \frac{z}{L^3} \right|} \quad (16)$$

При чистому зрушенні нормальні напруження дорівнюють нулю. Тоді дотичні напруження визначаються по формулах:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= 0; & \tau_{yz} &= 0; \\ \tau_{xz} &= K v_{\Pi} \frac{\delta_{max}^m}{\sqrt{3}^{m+1}} \left(6A \frac{z^5}{L^6} + 5B \frac{z^4}{L^5} + 4C \frac{z^3}{L^4} + 3D \frac{z^2}{L^3} \right)^m \times \\ &\times \operatorname{sign} \left(30A \frac{z^4}{L^6} + 20B \frac{z^3}{L^5} + 12C \frac{z^2}{L^4} + 6D \frac{z}{L^3} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Функція дисипації енергії

$$\begin{aligned} E = \varepsilon_i \cdot \sigma_i &= K v_{\Pi} \frac{\delta_{max}^{m+1}}{\sqrt{3}^{m+1}} \times \left(6A \frac{z^5}{L^6} + 5B \frac{z^4}{L^5} + 4C \frac{z^3}{L^4} + 3D \frac{z^2}{L^3} \right)^m \times \\ &\times \left| 30A \frac{z^4}{L^6} + 20B \frac{z^3}{L^5} + 12C \frac{z^2}{L^4} + 6D \frac{z}{L^3} \right|. \end{aligned} \quad (18)$$

З використанням отриманих залежностей були визначені параметри напружено-деформованого стану металу плоского бічного елемента профілю верхньої обшивки піввагона для випадку, коли швидкість формування $v_{\Pi} = 0,5$ м/хв; максимальна утяжка $\delta_{max} = 0,006$ м; $K = 125$ кГ/мм²; $m = 0,25$; $\kappa = 0,5$.

Як видно з рис. 3, деформації зрушення e_{xz} плавно зростають від нуля на початку осередку деформації до максимуму в перерізі $z = 0,5L$, а потім зменшуються до нуля в осьовій площині валків. Аналогічно змінюються подовжня деформація плоского бічного елемента і інтенсивність деформацій. Дотичні напруження τ_{xz} (рис. 4) плавно зростають від нуля на межах осередку деформації до максимуму – 301,35 Мн/м² (3075 кГ/мм²) – також в перерізі $z = 0,5L$. Тут їх знак змінюється, що обумовлено різними напрямками швидкостей деформацій на початку і кінці осередку формоутворення.

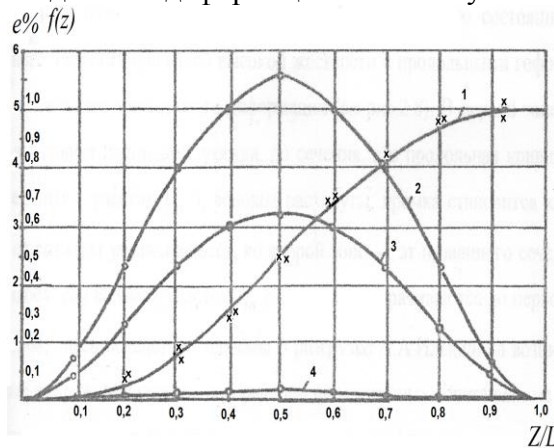


Рис.3 Графіки зміни функції $f(z)$ (1), деформації зрушення e_{xz} (2), інтенсивності деформації e_i (3) і відносній подовжній деформації e (4)

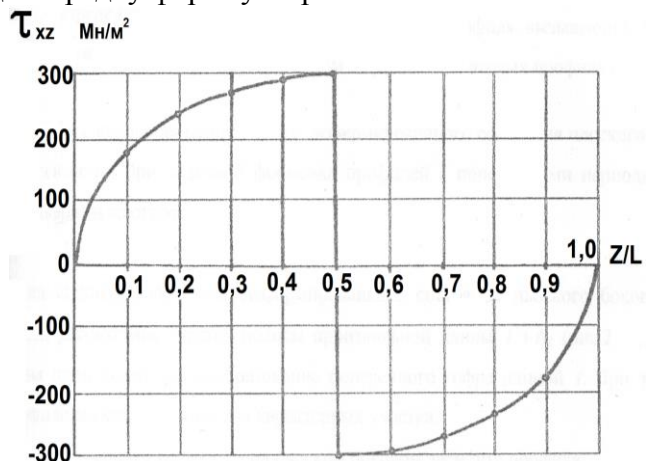


Рис.4 Зміна дотичних напружень τ_{xz}

Таким чином, аналіз напружено-деформованого стану плоского бічного елемента профілю дозволив виявити дві зони осередку деформації. У першій зоні – від перерізу, в якому починається формування гофра, до перерізу, де подовжня кривизна кромки міняє знак, – волокна розтягнуті, кромка стає криволінійною, її розміри збільшуються; у другій зоні – від названого перерізу до осьової площини валків - волокна коротшають до первинних розмірів, тут виникає залишкові напруження стискування (внаслідок розвантаження), які при певних поєднаннях механічних властивостей матеріалу і геометричних розмірів профілю можуть викликати пластичну втрату стійкості плоского бічного елемента, що супроводжується хвилеутворенням.

З умови рівності залишкових напружень стискування, визначуваних відносною подовжньою деформацією розтягування в першій зоні (14), критичним напруженням, при яких відбувається втрата стійкості, можна визначити оптимальні співвідношення

між механічними властивостями матеріалу і геометричними розмірами профілю, що дозволить проектувати технологічний процес без виникнення хвилястості на плоских бічних елементах уздовж крайніх гофрів.

Висновки

1. Виконаний аналіз напружено-деформованого стану металу на плоскій бічній (прилеглий до подовжньої кромки листа) ділянці профілів з подовжніми гофрами жорсткості, що періодично повторюються.

2. Проведені дослідження дозволили виявити дві зони у осередку деформації. Першу - від перерізу, в якому починається утяжка до перерізу, де подовжня кривизна кромки міняє знак. Ця зона характеризується розтягуванням волокон профілю. Другу - від вказаного перерізу до осьової площини валків, яка характеризується укороченням розмірів кромки до первинних і виникненням, відповідно до теореми про розвантаження, залишкових напружень стискування, які можуть викликати втрату стійкості плоского бічного елемента.

3. Встановлені причини утворення хвилястості профілю можуть бути використані при аналітичному рішенні завдання втрати стійкості і визначення критичних сполучень механічних властивостей і геометричних розмірів профілю, що виключають можливість хвилеутворення

Література

1. Тришевский О.И. Технология производства и возможности применения профилей высокой жёсткости в сельскохозяйственном машиностроении // Вестник Харьковского гос. университета сельского хозяйства "Повышение надёжности восстанавливаемых деталей машин". – 2000. – Вып. 4. – С. 300-302.

2. Тришевский О.И. Применение экономичных гнутых профилей в конструкциях сельскохозяйственной техники / Скобло Т.С. // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства "Підвищення надійності відновлюємих деталей машин". Том 2 – 2001. . – Вып. 8. – С. 333-338.

3. Тришевский О.И. Исследование влияния конфигурации формующих элементов валков на условия формообразования продольных периодических гофров методом фотоупругости / Ахлестин В.Л., Козлович М.М., Яковлева Р.А. // Сб. научн. трудов. «Гнутые профили проката» .–1977. Вып. 5. – С. 71-76.

Trishevsky O.I. Research of the tensely-deformed state of flat lateral element at rolling profiles with longitudinal periodic corrugations

The theoretical analysis of the tensely-deformed state of flat lateral element is in-process executed at the rolling profiles with longitudinal periodic corrugations. With the use of the got dependences the parameters of the tensely-deformed state of flat lateral element of the lateral edging of railway carriage are certain. The analysis of the obtained data allowed to educe two characteristic zones of deformation area, in one of that because of forming there are remaining tensions of compression, that at certain combinations of mechanical properties of material and geometrical sizes of profile can cause the plastic loss of stability of flat lateral element.

Keywords: the bent profiles, periodic corrugations, flat lateral element, tensely-deformed state, speeds of deformation, deformation, tangent tensions, remaining tensions.

References

1. Trishevsky O.I. Tehnologija proizvodstva i vozmozhnosti primeneniya profilej visokoi zhestkosti v selskohozaistvennom mashinostrojenii // Vestnik Kharkovskogo gos. Universiteta selskogo hozjaistva "Povishenie nadjezhnosti vosstanavlivaemih detalei mashin".– 2000.– Vip.4.-S.300-302.
2. Trishevsky O.I. Primenenie ekonomichnih gnutih profilei v konstrukcijah selskohozaistvennoi tehniki / T.S. Skoblo // Visnik Kharkivskogo derzhavnogo Universitetu silskogo gospodarsnva "Pidvischennja nadijnosti vidnovljuvanih detalei mashin".Tom 2 – 2001.–Vip.8.-S.333-338.
3. Trishevsky O.I. Issledovanie vlijanija konfiguracii formujuszhih elementov valkov na uslovija formoobrazovanija prodolnich periodicheskich gofrov metodom fotouprugosti / V.L.Ahlestin, M.M.Kozlovich, R.A.Jakovleva // Sb.nauchn.trudov. "Gnutie profili prokata"– 1977.Vip.5. – S.71-76.