

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗУСИЛЛЯ ДЛЯ ШТОВХАННЯ ГНУЧКОЇ СТРИЧКИ ВГОРУ ПО ПОВЕРХНІ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛІНДРА

**Пилипака С. Ф.**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри нарисної геометрії та комп'ютерної графіки  
Національного університету біоресурсів і природокористування України  
м. Київ, Україна

**Воліна Т. М.**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри проектування технічних систем  
Сумського національного аграрного університету  
м. Суми, Україна

**Кресан Т. А.**

кандидат технічних наук,  
докторант кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну  
Національного університету біоресурсів і природокористування України  
м. Суми, Україна

**Захаров М. М.**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри освітніх та інформаційних технологій  
Сумського обласного інституту післядипломної педагогічної освіти  
м. Суми, Україна

**Ребрій А. М.**

старший викладач кафедри проектування технічних систем  
Сумського національного аграрного університету  
м. Суми, Україна

Аналітичний опис руху тіла по поверхні викликає труднощі, пов'язані зі складенням диференціальних рівнянь такого руху. У багатьох випадках тіло розглядають як частинку, що призводить до спрощення диференціальних рівнянь, проте при цьому не враховується взаємодія частинок між собою під час руху технологічного матеріалу. Пропонується розглянути випадок, коли між частинками існує певний зв'язок, а саме: вони формують абсолютно гнучку нестискувану смугу прямокутного перерізу з розмірами  $a$  та  $b$ .

Смугу розташовано на внутрішній поверхні горизонтального циліндру (рис. 1, а). Для її штовхання вгору з постійною швидкістю  $V$  необхідно докласти зусилля  $T$ . Можна уявити, що смуга складається з елементарних ділянок  $ds$  (рис. 1, б), кожна з яких нахилена під кутом  $\alpha$  до горизонтальної площини. У такому випадку зусилля  $T$  є сумою зусиль кожного елемента смуги, тобто задача зводиться до інтегрування елементарних зусиль по довжині дуги  $s$  між точками  $A$  та  $B$ . Зусилля  $T$  визначимо саме для цієї ділянки без урахування смуги та діючих на неї сил за межами точок  $A$  та  $B$ .

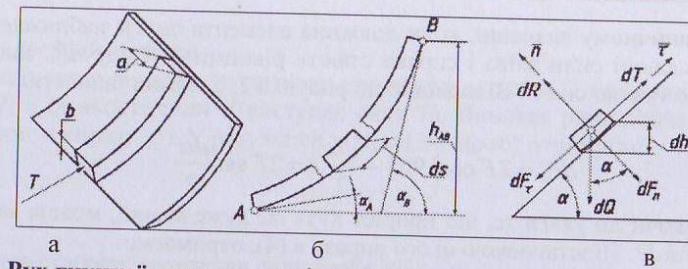


Рис. 1. Рух гнучкої смуги по циліндричній поверхні: а) форма смуги та її розташування на поверхні; б) елементарна ділянка смуги довжиною  $ds$ ; в) елемент смуги та діючі на нього сили у рухомій системі координат

У центрі елементарної ділянки смуги розташовано супровідний тригранник кривої (рис. 1, в), на орти якого необхідно спроеціювати усі сили, які діють на цю ділянку. Розглянемо ці сили.

Сила ваги  $dQ$ , спрямована донизу, визначається добутком об'єму  $a \cdot b \cdot ds$  на щільність матеріалу смуги  $q$  та сталу прискорення вільного падіння  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ :  $dQ = a \cdot b \cdot q \cdot g \cdot ds$ . Розкладемо цю силу на орти тригранника:

$$dQ_\tau = abqg \sin \alpha ds \quad \text{та} \quad dQ_n = abqg \cos \alpha ds \quad (1)$$

Внаслідок руху елемента по криволінійній траєкторії виникає відцентрова сила  $dI$ , спрямована протилежно орту  $n$ . Ця сила залежить від маси  $m = a \cdot b \cdot q \cdot ds$  елемента, швидкості  $V$  його руху та кривини  $k$  у поточній точці:

$$dI_n = abqkV^2 ds \quad (2)$$

За рахунок ваги смуги та її згинання вздовж нормалі попутно відцентровій силі виникає сила  $dP_n$ . З правого боку на елемент смуги діє сила  $F$ , яка в кінці елемента зростає на  $dF$  за рахунок різниці висот  $dh$  (рис. 1, в). Цією силою  $F + dF$  врівноважується елемент смуги та виникає результуюча сила  $dP_n$ . Для визначення її величини розглянемо рисунок 2, б.

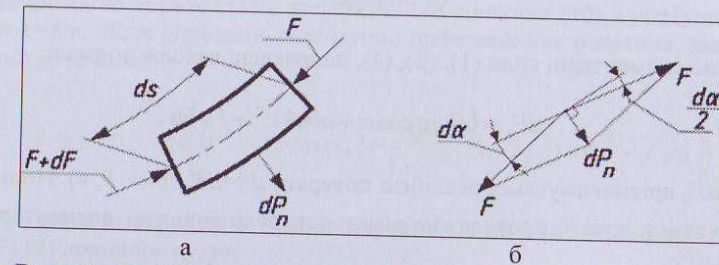


Рис. 2. Визначення елементарної сили  $dP_n$ : а) прикладені до елемента смуги стискаючі зусилля та елементарна сила  $dP_n$ ; б) схема розташування сил



При граничному значенні, коли довжина елемента смуги наближається до нуля, стискаючі сили зліва і справа стають рівними  $F$ . Силу  $dP_n$  знаходимо векторною сумою сил  $F$ . Відповідно до рисунка 2, б можна записати:

$$dP_n = 2F \cos\left(90^\circ - \frac{d\alpha}{2}\right) = 2F \sin \frac{d\alpha}{2}. \quad (3)$$

Приймаючи до уваги те, що приріст кута  $d\alpha$  дуже малий, можна записати:  $\sin(d\alpha/2) = d\alpha/2$ . Підстановкою цього виразу в (4), отримаємо:

$$dP_n = Fd\alpha \quad (4)$$

Зі зміною кута  $\alpha$  сила  $P_n$  буде збільшуватись на приріст  $dP_n = a \cdot b \cdot q \cdot dh$ . Для елемента смуги:  $dF = a \cdot b \cdot q \cdot g \cdot dh$ . Із рисунка 1, в маємо:  $dh = \sin\alpha ds$ . Початкова сила стискання  $F_0$  в точці  $A$  визначається інтегруванням виразу:

$$F_0 = abqg \int_{s_A}^{s_B} \sin\alpha ds. \quad (5)$$

Залежність  $\alpha = \alpha(s)$  у виразі (5) визначається з рівняння кривої поперечного перерізу циліндра. Можна знайти залежність зміни стискаючого зусилля  $F = F(s)$ , яке буде зменшуватись від  $F_0$  в точці  $A$  до нуля у точці  $B$ .

Силу (4) необхідно додати до інших елементарних сил (1) і (2), тому приведемо її в залежність від спільної змінної  $s$  (довжини дуги кривої перерізу циліндра):

$$dP_n = Fd\alpha = F \frac{d\alpha}{ds} ds,$$

де  $\frac{d\alpha}{ds} = k$  – кривина траєкторії. З урахуванням цього вираз (4) приймає вигляд:

$$dP_n = Fkds. \quad (6)$$

Додаємо елементарні сили (1), (2), (4), направлені вздовж нормалі:

$$dF_n = (abqg \cos\alpha + abqkV^2 + Fk)ds. \quad (7)$$

Сила  $dF_n$  врівноважується реакцією поверхні  $dR = dF_n$  (рис. 1, в). Нормальна реакція вздовж орта  $\tau$  протилежно швидкості руху викликає елементарну силу тертя  $dF_{f1}$ :

$$dF_{f1} = fdR = f(abqg \cos\alpha + abqkV^2 + Fk)ds, \quad (8)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя.

Ця сила тертя викликає додаткове стискаюче зусилля  $T$ , як показано на рисунку 2, а (в якості сили  $F$  виступає сила  $T$ ). Виникає рівнодіюча  $dP_{n2}$ , яку знаходимо з виразу (3). У результаті відповідно до (6) отримуємо:

$$dP_{n2} = Tkds.$$

Ця сила створює додаткову силу тертя  $dF_{f2}$ :

$$dF_{f2} = fdP_{n2} = fTkds, \quad (9)$$

Таким чином, повний приріст зусилля  $dT$ , яке пересуває елемент смуги, дорівнює сумі елементарних сил опору. З урахуванням знайдених виразів (1), (8) і (9) запишемо:

$$dT = abqg \sin\alpha ds + f(abqg \cos\alpha + abqkV^2 + Fk)ds + fTkds.$$

У результаті отримуємо диференційне рівняння:

$$\frac{dT}{ds} = abqg \sin\alpha + f(abqg \cos\alpha + abqkV^2 + Fk + Tk). \quad (10)$$

У випадку, який розглядається, кривою поперечного перерізу циліндра є дуга кола радіуса  $r$  ( $k = 1/r = \text{const}$ ). Із залежності  $da/ds = k$  знаходимо:  $\alpha = k \cdot s = s/r$ . Початкове  $s_A$  та кінцеве  $s_B$  значення дуги  $s$  запишуться:  $s_A = \alpha_A \cdot r$ ;  $s_B = \alpha_B \cdot r$ . За формулою (5) знаходимо зусилля стискання  $F_0$  в початку смуги, після чого його інтегруванням знаходимо зусилля  $F$ , враховуючи, що при  $s = s_A$   $F = F_0$ :

$$F = F_0 - abqgr(\cos\alpha_A - \cos ks) = abqgr(\cos ks - \cos\alpha_B). \quad (11)$$

Підстановкою виразу (11) в диференційне рівняння (10) з урахуванням того, що  $k = 1/r$ , після спрощень отримуємо диференційне рівняння, яке має наступний розв'язок:

$$T = Ce^{\frac{fs}{r}} - abq \left[ (V^2 - gr \cos\alpha_B) + \frac{gr}{1+f^2} \left( (1+2f^2) \cos \frac{s}{r} - f \sin \frac{s}{r} \right) \right], \quad (12)$$

де  $C$  – стала інтегрування. Її величину знаходимо з умови, що при  $s = s_B = \alpha_B \cdot r$  сила  $T$  (12) дорівнює нулю:



$$C = abqe^{-f\alpha_B} \left[ V^2 + \frac{fgr}{1+f^2} (f \cos \alpha_B - f \sin \alpha_B) \right]. \quad (13)$$

Приймаючи до уваги, що  $s/r = \alpha$ , та підстановкою  $C$  із (13) у (12), отримуємо залежність зусилля штовхання  $T = T(\alpha)$ :

$$T = abq \left[ \frac{(e^{f(\alpha-\alpha_B)} - 1)V^2 + gr \cos \alpha_B + \frac{abqgr}{1+f^2} (f \sin \alpha + fe^{f(\alpha-\alpha_B)} (f \cos \alpha_B - \sin \alpha_B) - (1+2f^2) \cos \alpha)}{1+f^2} \right]. \quad (14)$$

Щоб визначити зусилля  $T$  для штовхання смуги, необхідно за формулою (14) знайти значення при  $\alpha = \alpha_B$  і  $\alpha = \alpha_A$  та знайти їх різницю.

Таким чином, при складенні диференційного рівняння руху смуги враховані сили, які діють на її ділянку елементарної довжини. Отримані формули дають змогу розрахувати необхідну потужність для забезпечення заданої швидкості пересування смуги. Для цього достатньо помножити зусилля  $T$  на швидкість  $V$ .

#### RESEARCH OF QUALITY OF A CURRENT CONDUCTIVE SURFACE OF ALUMINUM WAVEGUIDES AT POLISHING WITH VARIOUS METHODS

**Tryshyn P. R.**

*Graduate Student at the Department «Engineering Technologies»  
National University «Zaporizhzhya Polytechnic»*

**Honchar N. V.**

*Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department «Engineering Technologies»  
National University «Zaporizhzhya Polytechnic»*

**Semeryuk T. N.**

*Assistant Professor at the Department «Computer systems and networks»  
National University «Zaporizhzhya Polytechnic»*

**Tereshchenko K. A.**

*Student at the department «Engineering Technologies»  
National University «Zaporizhzhya Polytechnic»  
Zaporizhzhya, Ukraine*

Manufacturing of aluminum waveguides is very complicated, especially on finishing operations due the high requirements to the quality of the internal channel. The waveguide is a non-detachable welded construction of a thin-walled tube of rectangular cross section and two flanges, which having an arbitrary spatial ar-

angement. U-turns of the waveguide channel are mainly performed by manual welding of sections of a rectangular tube, after which they are straightened (and polished in stages. This is done due to the inaccessibility of the docking places of the channel sections on the final product. Since the depth of penetration of the high-frequency current into the walls of the waveguide is 1.1...1.9  $\mu\text{m}$ , therefore, the internal channel must be made with a roughness of 0.8...1.6  $\mu\text{m}$  [1]. It is allowed to reduce it to  $Ra3.2$  in places of transitions and turns; this toleration is explained with difficulty at processing. Deformations and surface defects occur in the welding areas of the segments, which are eliminated by finishing processing (burnishing, straightening, polishing, etc.). An analysis of the quality of waveguides at the factory [2] according to the basic technology showed that in manual welding, depending on the qualifications of the welder, the seams can have significant instability of geometric dimensions, convexity or concavity of the inner surface, and other defects. Straightening and burnishing of the waveguide channel eliminates the instability of the form, but it often leads to the appearance of new scribe marks and scratches with a depth of up to 0.05 mm. Finishing processing is necessary to eliminate them. The production volume, the versatility of the method, the production cost of processing, and the achieved quality of roughness should be taken into account during choosing a finishing method. The quality of the current-conductive surface of the waveguides is a complex of properties of its surface layer, which are formed as a result of exposure to the surface of one or more sequentially applied finishing methods of processing.

The magnitude of the active losses in the waveguide substantially depends on the roughness of the inner surface and the instability of the form. Losses of microwave power increase by about 1.2 times when a roughness value equals to half of the penetration depth; when a roughness equals to the depth of penetration it increases about 1.6 times; when a roughness value is twice that of the penetration depth – about 1.8 times [3]. On the other hand, an unreasonable increase in the requirements for the quality of such surfaces in excess of the calculated values leads to an increase in cost price.

Analysis of the existing finishing technologies of processing the internal channel of the waveguides of the radar industry showed that labor-intensive methods are mainly used that require complex expensive equipment: anode-abrasive vibration honing, electrochemical polishing, grinding, abrasive-extrusion processing, pneumatic-, turbo-, magneto-abrasive methods, etc. Oftentimes 2-3 methods are used sequentially, for example, mechanical and chemical ones when the quality of the internal channel must be high. However, basically these methods are intended to be used for processing rectilinear waveguides and they cannot help achieve high quality of surface in hard-to-reach areas of channels having transitions and bends. Only a few methods from a wide range are suitable for processing thin-walled and complex-profile waveguides at welding places under conditions of small scales of production. The most practical finishing method in small-scale production of waveguides is processing by means of small-scale mechanization, which has the following advantages:

- 1) low cost of consumables;