

Грушко О. В.
Гуцалюк О. В.

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ПРОЦЕСАХ ВІСЕСИМЕТРИЧНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ІЗ ВРАХУВАННЯМ КАРТИ МАТЕРІАЛУ

В світі існує тенденція на зменшення затрат людських та енергетичних ресурсів в процесах формозміни шляхом поглибленого аналізу результатів моделювання конкретних процесів. Це дає можливість уникати формування бракувальних ознак, збільшити ресурс інструменту, покращити якісні характеристики готового виробу. Так, на сьогодні залишається маловивчене питання механіки процесу прямого видавлювання (редукування) на ділянках, де процес деформації є неусталеним, що особливо важливо при обробці заготовок з співвідношенням довжини до діаметра 2...5 (далі - короткі) [1]. Такі заготовки, для прикладу, на основі порошкових матеріалів системи вольфрам-нікель-залізо (W-Ni-Fe), використовуються в виробках спеціального призначення [2]. В роботі [3], на основі методу скінченних елементів, наведені результати дослідження напруженого стану в процесі редукування у вигляді епюр головних напружень, інтенсивності напружень при змінних значеннях величини відносного обтиску та кута нахилу робочого інструменту. Розрахункова схема та залежність максимальних головних нормальних напружень від величини відносного обтиску на прикладі вісесиметричного процесу редукування зображені на рис. 1, проте ці результати стосуються лише розрахунків для порошкового сплаву W-Ni-Fe, з дослідженою реологією [2].

Зауважимо про деякі особливості практичної реалізації процесу редукування. Хід процесу редукування характеризується збільшенням площі контакту пари інструмент-заготовка шляхом збільшенням їх відносного натягу або коефіцієнта тертя. При збільшенні площі контакту слід забезпечити необхідну довжину інструменту, в протилежному випадку інструмент може зрізати хвилю матеріалу, що виникає перед ним. Заготовка, що обробляється редукуванням, може викривити свою вісь через втрату стійкості, тому її довжина не має бути більшою за критичну. Має виконуватись умова:

Має виконуватись умова: $\frac{F_{деф}}{A_0} < \sigma_T$, де $F_{деф}$ – зусилля деформування;

A_0 – площа поперечного перерізу зразка; σ_T – границя текучості. Обробка заготовки може здійснюватися з використанням інструменту на основі прямолінійних та криволінійних твірних. Оскільки формування криволінійних твірних інструменту є складним і високовартісним, тому для подальшого аналізу взято матриці з прямолінійною формою контактної поверхні.

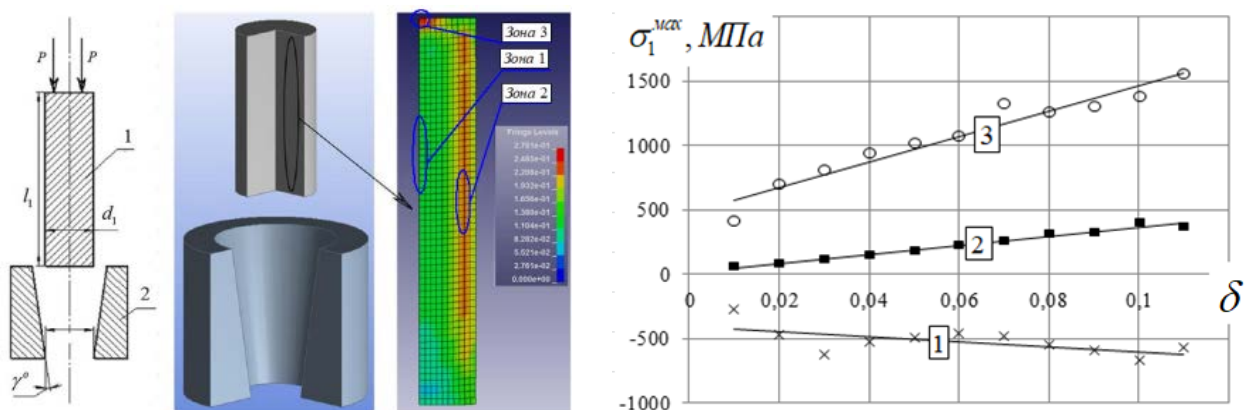
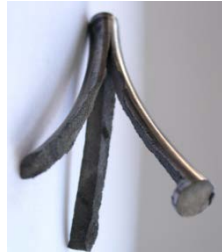


Рис. 1. Залежність максимальних головних нормальних напружень від величини відносного обтиску

З рис. 1 видно, що в зонах 2 і 3 спостерігаються розтягувальні напруження, які можуть стати причиною руйнування (рис. 2). В таких зонах суттєве значення має вигляд функціональних залежностей карти матеріалу, а саме кривої течії та діаграми пластичності. Властивості сплаву W-Ni-Fe у вигляді кривої течії описуються з високою точністю залежністю:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n = 1730\varepsilon_i^{0,259}, (\text{МПа}). \quad (1)$$



а



б

Рис. 2. Поведінка зразків системи W-Ni-Fe в процесі редукування при куті нахилу робочого конуса 7° (а – тріщина на осі симетрії зразка, б – тріщини на поверхні зразка)

Відповідно до роботи [2] побудована крива текучості (рис. 3), яка апроксимована залежностями:

$$\sigma_i = A_c (e + \varepsilon_i)^{n_c}, \quad (2)$$

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n, \quad (3)$$

де σ_i – інтенсивність напружень, ε_i – інтенсивність деформацій, A та n – коефіцієнти апроксимації.

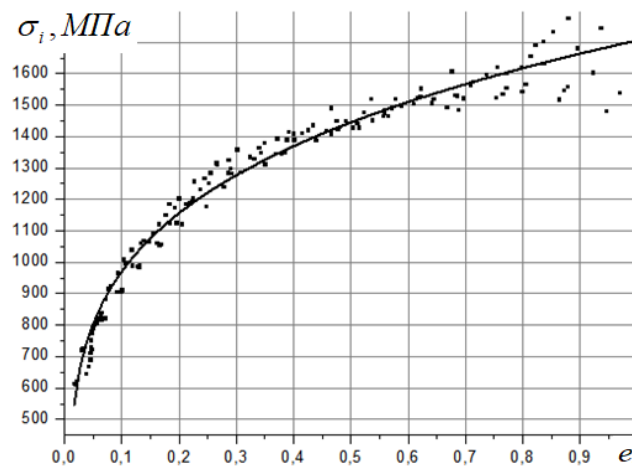


Рис. 3. Крива течії сплаву W-Ni-Fe.

В результаті статистичної обробки результатів отримані коефіцієнти апроксимації для сплаву W-Ni-Fe (W – 89 %, Ni – 7,5 %, Fe – 3,5 %): $A = 1731,6 \pm 9$ МПа; $A_c = 1709,6 \pm 9$ МПа; $n = 0,259 \pm 0,004$; $n_c = 0,236 \pm 0,006$; $e_0 = -0,009 \pm 0,002$. Сплав інтенсивно зміцнюється при пластичному деформуванні, зокрема, напруження текучості збільшується від початкового до максимального значення в 2,63 раза, при цьому ступінь зміцнення $\frac{A}{\sigma_{0,2}} = 2,63$, показник $n = 0,259$. Також наведемо експериментальні значення модуля Юнга ($E = 1,4 \cdot 10^{10}$ Па), границі міцності ($\sigma_e = 920$ МПа) та границі текучості ($\sigma_m = 650$ МПа).

Побудову діаграм пластичності здійснювали за значеннями граничних деформацій в стандартних дослідах при розтягу $e_p(\eta=1) = 0,12 \pm 0,005$, стиску $e_p(\eta=-1) = 0,92 \pm 0,09$ і крученні $e_p(\eta=0) = 0,69 \pm 0,01$.

В роботі [4] показано, що для діаграми пластичності (рис. 4) в діапазоні $-2 \leq \eta \leq 0$ справедливе рівняння:

$$e_p = \frac{e_p(\eta=0)e_p(\eta=-1)\exp(-\eta)}{e_p(\eta=-1) + \eta[e_p(\eta=-1) - 2,72e_p(\eta=0)]} = \frac{0,63 \cdot \exp(-\eta)}{0,92 - 0,93 \cdot \eta}, \quad (4)$$

де $e_p(\eta=-1)$ і $e_p(\eta=0)$ – пластичність матеріалу, відповідно, при осьовому стиску зі змащенням і крученні.

Апроксимація діаграми пластичності для діапазону $-1 \leq \eta \leq 0$ може бути здійснена за допомогою рівнянь, що містять фізично змістовні коефіцієнти впливу зміни схеми напруженого стану на пластичність [5]:

$$e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-0,3 \cdot \eta), \quad (5)$$

де η – показник напруженого стану, $e_p(\eta)$ – шукана величина граничних деформацій.

На ділянці зміни показника напруженого стану $0 \leq \eta \leq 2$ граничні деформації розраховуються у вигляді

$$e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-1,75 \cdot \eta). \quad (6)$$

Вигляд діаграми пластичності приведено на рис. 4.

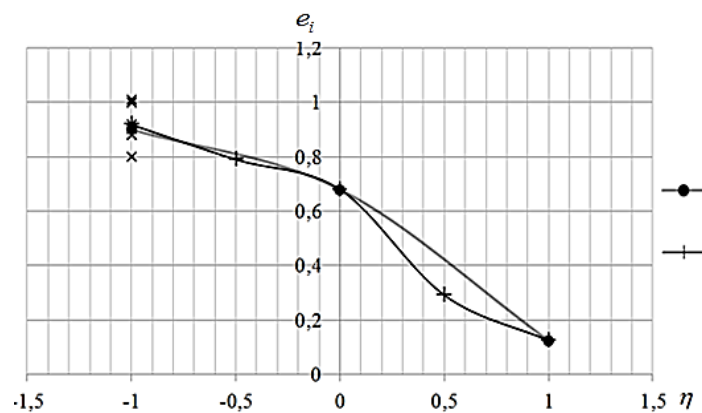


Рис. 4. Діаграма пластичності сплаву W-Ni-Fe[2].

Поширення наявних результатів дослідження напруженого стану для матеріалів з іншими механічними (реологічними) властивостями представляє в низці випадків науково-практичний інтерес. При цьому використання отриманих раніше результатів досліджень напруженого стану, енергосилових характеристик в чисельному вигляді для конкретного процесу дозволяє не моделювати процес знову, а отримувати аналогічні характеристики для довільного реологічно-подібного матеріалу. Згідно з загальною теорією визначення напружень в тензорному вигляді здійснюється за допомогою [6]:

$$\sigma_{ij} - \sigma_0 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} e_{ij}, \quad (7)$$

$$\tau_{jk} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} \gamma_{jk}, \quad (8)$$

де σ_{jj} – нормальні складові напруженого стану в точці; σ_0 – середнє нормальне напруження в точці; τ_{jk} – дотичні складові напруженого стану в точці; e_{jj}, γ_{jk} – складові деформованого стану в точці.

Метою даної роботи є моделювання напруженого стану і, зокрема, контактних напружень, на основі даних розрахунків напружено-деформованого стану в віссиметричному процесі редукування та карти реологічно подібних матеріалів до сплаву W-Ni-Fe.

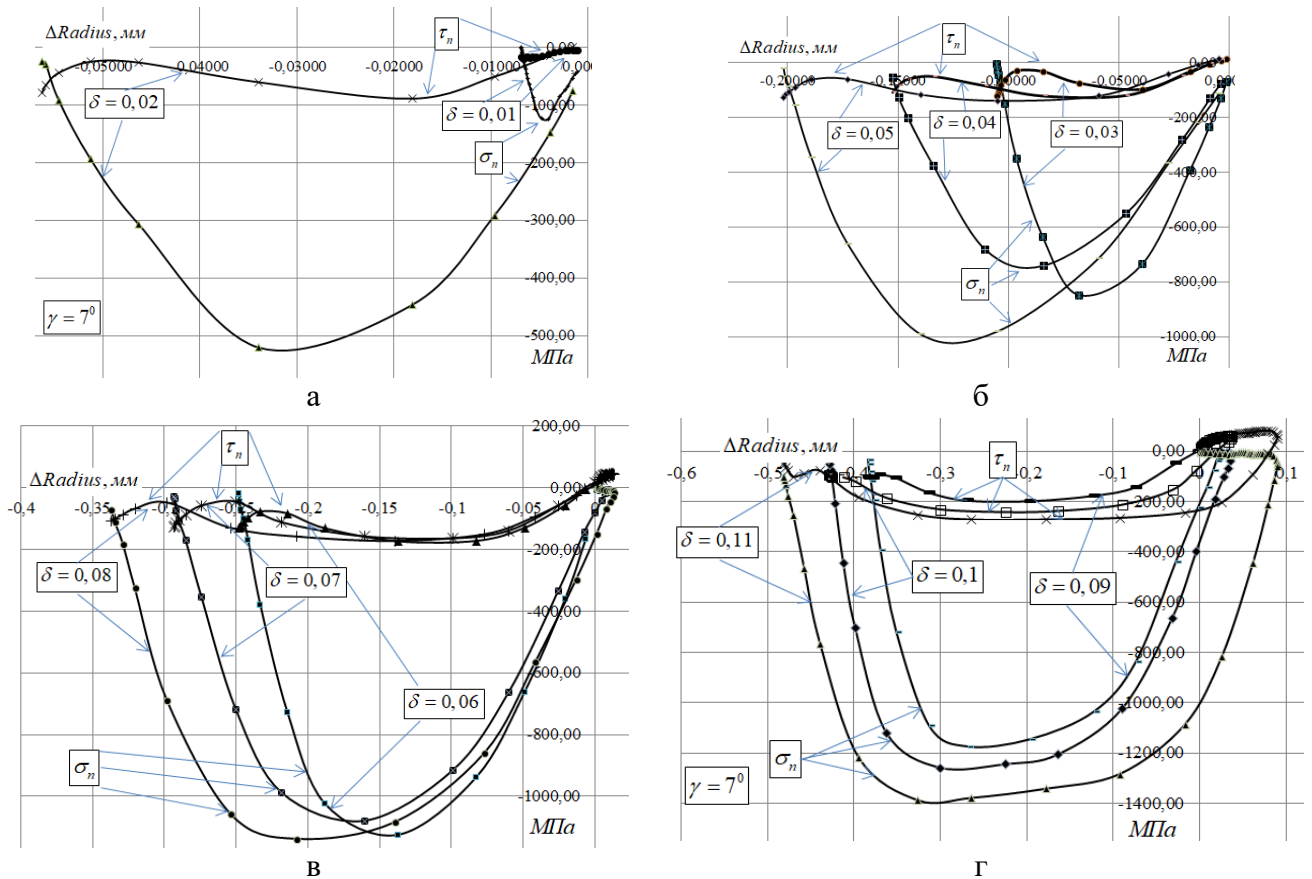


Рис. 5. Значення контактних напружень по контуру матриці для процесу редукування з кутом нахилу матриці $\gamma = 7^\circ$ та різних обтисків ($\delta = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,11$)

Практичний інтерес мають дані розрахунку полів напружень в осередку деформацій в зонах контакту матриці та заготовки. Значення контактних напружень σ_n, τ_n в зоні контакту дає можливість оцінити зносостійкості матриць, вибрати їх раціональний профіль.

Шляхом найпростіших перетворень перейдемо до циліндричної системи координат для контактних напружень на контурі матриці ($\sigma_x \rightarrow \sigma_r, \sigma_y \rightarrow \sigma_z, \sigma_z \rightarrow \sigma_\varphi, \tau_{xy} \rightarrow \tau_{rz}$):

$$\sigma_n = \sigma_r \cdot \cos^2 \gamma + \sigma_z \cdot \sin^2 \gamma + \tau_{rz} \sin 2\gamma, \quad (9)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} \sin 2\gamma + \tau_{xy} \cos 2\gamma. \quad (10)$$

Матриці з прямолінійною твірною (прямолінійні) мають розподіл напружень по поверхні контакту, показаний на рис. 5.

Для оцінки механіки процесу редукування розглянемо компоненти тензора напружень в контактній області, а також значення максимальних контактних напружень по контуру матриці (рис. 6).

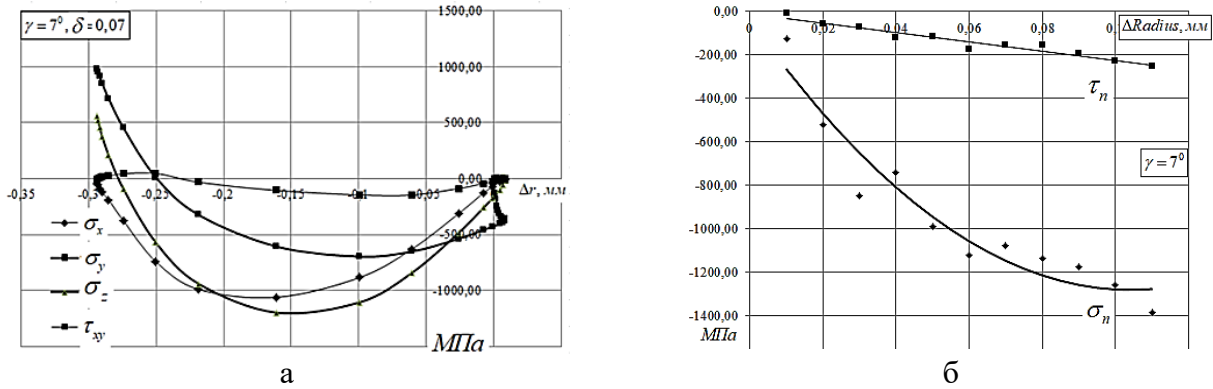


Рис. 6. Зміна величини компонент тензора напружень σ_z , σ_r , σ_φ , τ_{rz} в контактній області (а) та значення максимальних контактних напружень по контуру матриці для процесу редукування з кутом нахилу матриці $\gamma = 7^\circ$ (б)

Вивчення особливостей процесу редукування на основі матеріалу W-Ni-Fe дає можливість забезпечити реалізацію процесу з необхідними якісними характеристиками виробу. Для більш широкого використання даних досліджень варто використати підходи роботи [2], згідно з якими, моделювання деформування заготовок з матеріалів з подібною реологією повторного моделювання не потребують. Це може здійснюватись за зазначеними вище залежностями формували перерахунку (7), (8). Для випадку вісесиметричного процесу редукування із врахуванням карти матеріалу, зокрема, апроксимації (1), набувають вигляду:

$$\sigma'_{cp} = \sigma_{cp} \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_{cp} \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (11)$$

$$\sigma'_\varphi = \sigma_\varphi \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (12)$$

$$\sigma'_z = \sigma_z \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_z \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (13)$$

$$\sigma'_r = \sigma_r \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (14)$$

$$\tau'_{rz} = \tau'_{zr} = \tau_{rz} \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (15)$$

$$\sigma'_n = \sigma_n \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_n \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}, \quad (16)$$

де σ_i (σ'_i)- інтенсивність напружень модельного (натурного) матеріалу, ε_i – інтенсивність деформацій, A' та n' – коефіцієнти апроксимації для натурного матеріалу, σ_{cp} (σ'_{cp}) – середнє напруження модельного (натурного) матеріалу, σ_φ (σ'_φ) – нормальні тангенціальні напруження в циліндричній системі координат для модельного (натурного) матеріалу, σ_z (σ'_z) – нормальні осьові напруження в циліндричній системі координат для модельного (натурного) матеріалу, σ_r (σ'_r)- нормальні радіальні напруження в циліндричній системі координат для модельного (натурного) матеріалу, τ'_{rz} , τ'_{zr} , τ_{rz} – відповідно дотичні напруження для модельного та натурного матеріалу, σ_n (σ'_n)- нормальні контактні напруження модель-

ного (натурного) матеріалу, $\tau_n (\tau'_n)$ – дотичні контактні напруження для модельного (натурного) матеріалу, $\tau_{\rho\theta}, \tau_{\theta\rho}, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta z}$ – дотичні напруження в циліндричній системі координат.

Залежності (11)-(16) отримано на основі апроксимації (1), проте за наявності інших даних з напруженого стану для конкретного матеріалу з відомою кривою течії (3) ці формули не змінюють своєї структури, тому можуть бути використані за основу для моделювання будь-якого вісесиметричного процесу пластичного деформування з відповідною заміною апроксимувальних коефіцієнтів.

ВИСНОВКИ

Отримано епюри контактних напружень та значення максимальних контактних напружень по контуру матриці для процесу редукування з кутом нахилу матриці 7^0 та різних обтисків, що дає змогу підбирати раціональні параметри інструменту та умови змащення.

Отримано залежності перерахунку компонентів тензора напружень, контактних напружень для матеріалів з подібною реологією, що розширює область застосування отриманих результатів для розрахунку технологічних параметрів процесу редукування заготовки з різних конструкційних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайдес С. А., Исаев А. Н. Технологическая механика осесимметрического деформирования. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 432 с.
2. Грушко О. В., Гуцалюк О. В., Андреев І. В., Мельниченко В. В., Студенець С. Ф. Механічні характеристики сплавів системи W-NI-Fe. *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України: Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. С. 88–95.
3. Грушко О. В., Гуцалюк О. В. Моделирование процесса редукування циліндричних заготовок з визначенням основних параметрів деформованого стану. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, 2016. № 1(42). С. 57–62.
4. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Высшая школа, 1983. 175 с.
5. Дель Г. Д. Технологическая механика. Москва: Машиностроение, 1978. 174 с.
6. Ильющин А. А. Механика сплошной среды. Москва: МГУ, 1990. 310 с.
7. Грушко А. В. Метод эквивалентной оценки энергосиловых параметров процессов пластического формоизменения. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. № 47. С. 14–23.

REFERENCES

1. Zaides S.A., Isaev A.N. Technological mechanics of axisimetric deformation. Irkutsk: Publishing house of ISTU. 2007, 432 p. (in Russian).
2. Grushko O.V., Gutsalyuk O.V., Andreev I.V., Melnichenko V.V., Studenets S.F. Mechanical characteristics of alloys of the W-NI-Fe system. *G.V. Karpenko Institute of Physics and Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Physico-chemical mechanics of materials*. 2018, pp. 88–95. (in Ukrainian).
3. Grushko O.V., Gutsalyuk O.V. Modeling of the process of reduction of cylindrical workpieces with determination of the main parameters of the deformed state. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2016. 1 (42), pp. 57–62. (in Ukrainian).
4. Ogorodnikov V.A. Evaluation of the deformability of metals during pressure processing. Kyiv: Higher school. 1983, 175 p. (in Russian).
5. Del G.D. Technological mechanics. Moscow: Mechanical Engineering. 1978, 174 p. (in Russian).
6. Ilyushin A.A. Mechanics of a continuous medium. Moscow: Moscow State University. 1990, 310 p. (in Russian).
7. Grushko A.V. Method of equivalent estimation of power parameters of processes of plastic deformation. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*. 2012, 47, pp. 14–23. (in Russian).

Грушко О. В. – д-р техн. наук, професор ВНТУ;

Гуцалюк О. В. – канд. техн. наук, наук. співробітник ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет України, м. Вінниця.

E-mail: oleksandrompm@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 11.12.2019 р.