

УДК 621.983

І. О. Сивак, д. т. н., проф.; С. І. Сухоруков, к. т. н., доц.; Є. І. Шевчук

НАПРУЖЕНИЙ СТАН В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПІД ЧАС РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Виконано дослідження напруженого стану в осередку деформації під час ротаційної витяжки осесиметричних деталей із листової заготовки. Установлено закономірності розподілу показників напруженого стану в осередку деформації та визначено величину використаного ресурсу пластичності залежно від геометричних характеристик ролика, товщини листової заготовки і механічних характеристик матеріалу заготовки.

Ключові слова: ротаційна витяжка, напруження, осередок деформації, показники напруженого стану, кінцева деталь.

У різних галузях машинобудування знайшли широке використання осесиметричні тонкостінні вироби, до якості та експлуатаційних властивостей яких висувають високі вимоги. Для виготовлення таких виробів широко застосовують методи ротаційної витяжки. Сьогодні ціла низка робіт присвячена експериментальним дослідженням процесу ротаційної витяжки [1 – 3], але практично відсутні методи оцінки схеми напруженого стану та величини використаного ресурсу пластичності в осередку деформації та їх впливу на якість готових виробів.

Необхідно зазначити, що особливість процесу ротаційної витяжки осесиметричних деталей із листових заготовок полягає в тому, що пластична деформація протікає в локальному об'ємі контакту інструмента і заготовки. Схема напруженого стану в цьому об'ємі залежить від форми і розмірів заготовки та інструменту, взаємного їх розміщення й режимів обробки.

Мета цієї роботи полягає у визначенні закономірностей розподілу показників напруженого стану та величини використаного ресурсу пластичності в осередку деформації залежно від параметрів процесу ротаційної витяжки.

У роботі розглянуто процес ротаційної витяжки тонкої оболонки із листової заготовки. При цьому осередок деформації розбито на три ділянки (рис. 1). Ділянка 1 перебуває в умовах об'ємного напруженого стану, а на ділянці 2 має місце плоска деформація. До зони 3 віднесено фланець, який знаходиться в умовах плоского напруженого стану. У роботі [4, 5] визначено напружений стан для ділянки 2 в полярній системі координат ρ , α з початком координат у центрі кривизни робочої поверхні ролика (рис. 2). У виділеному елементі заготовки, обмеженому радіусами ρ_1 і ρ_2 та кутами $\alpha=0$ і $\alpha=\alpha_m$, діють радіальні напруження σ_ρ , тангенціальні напруження σ_α та дотичні напруження $\tau_{\rho\alpha}$. Різниця радіусів ρ_2 і ρ_1 дорівнює товщині листової заготовки δ .

Рівняння рівноваги для плоскої задачі в полярних координатах мають вигляд [4, 5]:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \alpha} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\alpha}{\rho} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial \alpha} + \rho \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \rho} + 2\tau_{\rho\alpha} = 0.$$

Умова пластичності в цій задачі набуває вигляду:

$$\sigma_\alpha - \sigma_\rho = 2\tau_s. \quad (2)$$

Після диференціювання першого рівняння системи (1) по α з урахуванням умови

пластичності (2) та після диференціювання другого рівняння системи (1) по ρ і віднімання від отриманого другого рівняння першого отримано рівняння для визначення дотичних напружень [4, 5]

$$\rho^2 \cdot \frac{\partial^2 \tau_{\rho\alpha}}{\partial \rho^2} - \frac{\partial^2 \tau_{\rho\alpha}}{\partial \alpha^2} + 3\rho \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \rho} = 0. \quad (3)$$

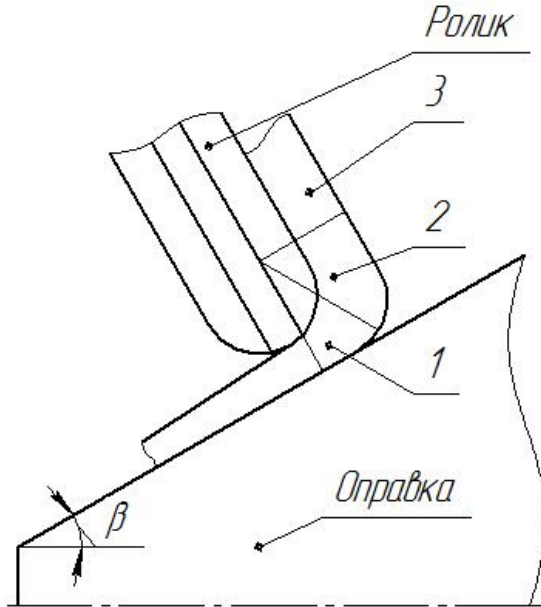


Рис. 1. Схема ділення осередку деформації на ділянки

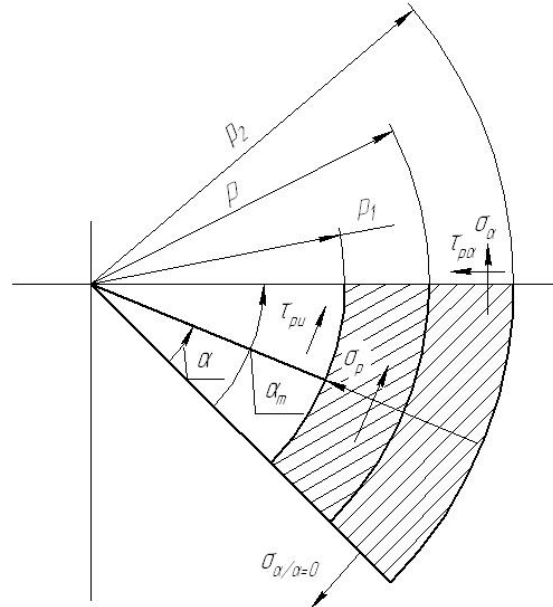


Рис. 2. Схема напруженого стану на ділянці 2 під час ротаційної витяжки

Розв'язок рівняння (3) отримано за таких граничних умов. У зоні контакту заготовки та ролика за $\rho = \rho_1$ дотичні напруження дорівнюють: $\tau_{\rho\alpha} = -m\tau_s$, де m – фактор тертя Прандля. На вільній поверхні заготовки за $\rho = \rho_2$ дотичне напруження $\tau_{\rho\alpha} = 0$. За $\alpha = 0$ дотичні напруження $\tau_{\rho\alpha} = 0$, оскільки цей майданчик є головним, а за $\alpha = \alpha_m$ дотичні напруження приймають максимальне значення $\tau_{\rho\alpha} = -\tau_s$. Після розв'язання рівняння (3) за прийнятих граничних умов у роботі [5] для дотичного напруження $\tau_{\rho\alpha}$ отримано такий вираз

$$\tau_{\rho\alpha} = -\tau_s \sqrt{1-c} \frac{\alpha}{\alpha_m} + \frac{\tau_s \sqrt{1-c} \cdot \sin\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right)}{\rho \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} \cdot \left[\rho_1 \left(m - \frac{\alpha}{\alpha_m}\right) \cdot \sin\left(\omega \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_2}\right) + \rho_2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_m} \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_1}\right) \right]. \quad (4)$$

Для визначення σ_ρ задача (1) розв'язана в [4, 5] з використанням методу розділення змінних при однорідних граничних умовах:

$$\sigma_\rho = \frac{\tau_s \cdot \sqrt{1-c}}{\alpha_m} \cdot \left[\ln \frac{\rho}{\rho_2} + \left(\frac{\rho_1}{\rho(1+\omega^2)} \cdot \frac{\sin\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_2}\right) + \omega \cdot \cos\left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_2}\right)}{\sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} - \frac{\rho_1 \cdot \omega}{\rho_2(1+\omega^2) \cdot \sin\left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[\pi \cdot \cos\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right) \left(m - \frac{\alpha}{\alpha_m}\right) - \sin\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_m}\right) \right] + \right.$$

$$+ \left[\frac{\rho_2 \left(\sin \left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_1} \right) + \omega \cdot \cos \left(\omega \ln \frac{\rho}{\rho_1} \right) \right)}{\rho(1 + \omega^2) \cdot \sin \left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)} - \frac{\sin \left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) + \omega \cdot \cos \left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}{(1 + \omega^2) \cdot \sin \left(\omega \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)} \right] \times \quad (5)$$

$$\times \left\{ \frac{\pi \alpha}{\alpha_m} \cdot \cos \left(\frac{\pi \alpha}{\alpha_m} \right) + \sin \left(\frac{\pi \alpha}{\alpha_m} \right) \right\} + 2\tau_s \cdot \sqrt{1 - c} \ln \frac{\rho}{\rho_2}.$$

Нормальне напруження σ_α визначали із рівняння (2).

У цій роботі отримані значення σ_α , σ_ρ , $\tau_{\rho\alpha}$ використано для аналізу схеми напруженого стану в зоні 2 осередку деформації та для оцінки гранично допустимого формозмінення. При цьому показник напруженого стану η розраховували за формулою [6, 7]

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad (6)$$

де $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{i,j} \cdot \delta_{i,j}$ – середнє напруження, σ_u – інтенсивність напружень.

Параметр Надаї-Лоде дорівнює:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (7)$$

Головні напруження σ_1 , σ_2 , σ_3 , розраховували за формулою [6]:

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{\sigma_\alpha + \sigma_\rho}{2} \pm \sqrt{(\sigma_\alpha + \sigma_\rho)^2 + 4\tau_{\rho\alpha}^2}. \quad (8)$$

У роботі отримано закономірності розподілу показника напруженого стану η і параметр Надаї-Лоде μ_σ в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α для листових заготовок товщиною $\delta=0,8$ мм, $\delta=1,0$ мм і $\delta=1,2$ мм із алюмінію АД1 і сталі 10. Розрахунки виконано для радіусів робочої поверхні ролика $R_{рол}=1,5$ мм і $R_{рол}=4,0$ мм. Кут оправки β прийнято таким, що дорівнює $\beta=45^\circ$.

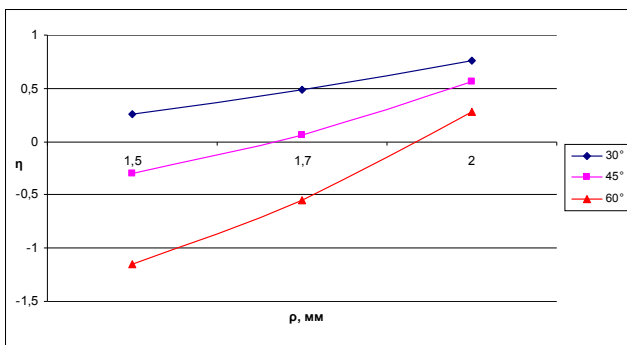


Рис. 3. Розподіл показника напруженого стану η в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α за товщини заготовки $\delta=0,8$ мм

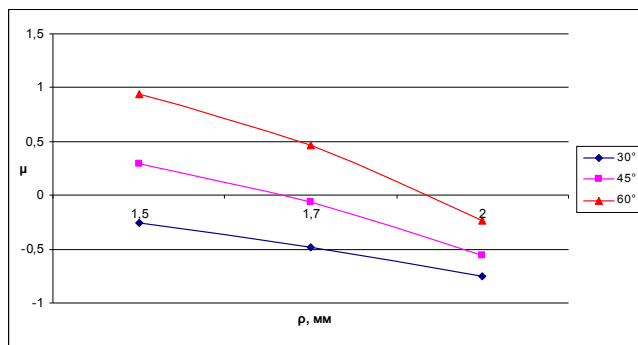


Рис. 4. Розподіл параметра Надаї-Лоде μ_σ в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α за товщини заготовки $\delta=0,8$ мм

Результати розрахунку для ролика з радіусом робочої поверхні $R_{рол}=1,5$ мм і різних товщин листової заготовки наведено на рис. 3 – 8. Із аналізу отриманих результатів випливає, що закономірності розподілу показників η і μ_σ по об'єму осередку деформації не залежать від матеріалу листової заготовки.

Як видно із приведених на рис. 3 – 8 залежностей, показник напруженого стану η зростає

зі збільшенням радіуса ρ і зменшується зі збільшенням кута α . Параметр Надаї-Лоде μ_σ зменшується із ростом радіуса ρ та зростає зі збільшенням кута α . Наприклад, за $\delta=0,8$ мм $R_{\text{рол}}=1,5$ мм за зміни ρ від $\rho=1,5$ мм до $\rho=2,0$ мм показник η зростає від $\eta=-1,152$ до $\eta=0,283$ за $\alpha=60^\circ$ і від $\eta=0,258$ до $\eta=0,755$ за $\alpha=30^\circ$ (рис. 3). Параметр Надаї-Лоде μ_σ зменшується за тих же умов від $\mu_\sigma=0,939$ до $\mu_\sigma=-0,239$ за $\alpha=60^\circ$ і від $\mu_\sigma=-0,253$ до $\mu_\sigma=-0,755$ за $\alpha=30^\circ$ (рис. 4). За фіксованого значення радіуса ρ , наприклад, за $\rho=1,5$ мм показник η зменшується від $\eta=0,258$ до $\eta=-1,152$ за зростання α від $\alpha=30^\circ$ до $\alpha=60^\circ$ (рис. 3), а параметр Надаї-Лоде μ_σ за тих же умов зростає від $\mu_\sigma=-0,253$ до $\mu_\sigma=0,939$ (рис. 4). Із зростанням товщини листової заготовки значення показника η зменшуються, а параметра Надаї-Лоде μ_σ зростають (рис. 3 – 8), тобто, чим більша товщина заготовки, тим м'якша схема напруженого стану в осередку деформації і тим менша інтенсивність накопичення пошкоджень і, відповідно, менша величина використаного ресурсу пластичності. Такий результат є важливим, оскільки отриману конічну заготовку плануємо використати в подальшому для виготовлення деталі більш складної форми шляхом подальшої пластичної деформації.

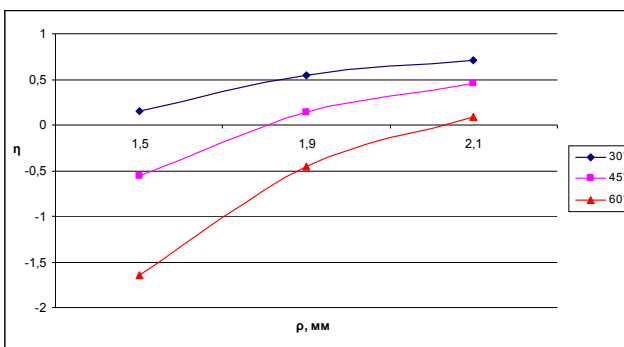


Рис. 5. Розподіл показника напруженого стану η в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α за товщини заготовки $\delta=1,0$ мм

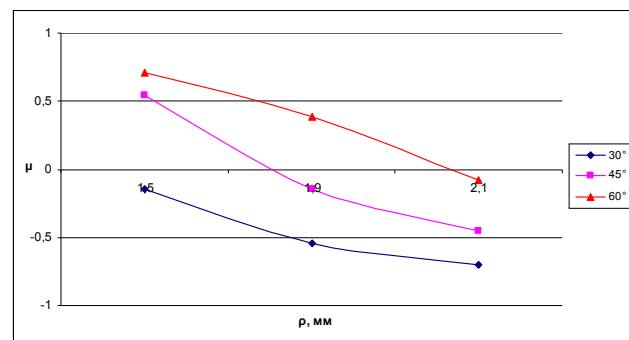


Рис. 6. Розподіл параметра Надаї-Лоде μ_σ в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α за товщини заготовки $\delta=1,0$ мм

Під час використання для ротаційної витяжки ролика з радіусом робочої поверхні $R_{\text{рол}}=4,0$ мм характер залежностей показника напруженого стану η і параметра Надаї-Лоде μ_σ від радіуса ρ і кута α аналогічні приведеним на рис. 3 – 8. Однак числові значення показника η в середньому на (75 – 80)% більші, а числові значення параметра Надаї-Лоде μ_σ на (60 – 80)% менші за числові значення цих величин, приведених на рис. 3 – 8.

Аналіз результатів розрахунків напруженого стану показує, що навантаження в осередку деформації близьке до простого, тому величину використаного ресурсу пластичності ψ можна визначити за критерієм Г. А. Смірнова-Аляєва [8]:

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (9)$$

де e_u – ступінь деформації, e_p – гранична деформація для цієї схеми напруженого стану.

Здатність матеріалу заготовки до пластичної деформації без руйнування під час ротаційної витяжки прийнято характеризувати величиною стоншення, яка для металу, що деформується, за цією схемою напруженого стану не повинна перевищувати граничної деформації e_p . Загалом величину стоншення визначають залежністю [9]:

$$e_u = \ln \frac{h_0}{h}, \quad (10)$$

де h_0 – початкова товщина листової заготовки, h – товщина стінки деталі після ротаційної витяжки.

Залежність пластичності від схеми напруженого стану описували поверхнями граничних деформацій, які для досліджуваних матеріалів апроксимували залежностями [10]:

для сталі 10

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 0.78 \exp(0.59 \cdot \mu_\sigma - 0.71 \cdot \eta), \quad (11)$$

для сплаву алюмінію АД1

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1.2 \exp(0.42 \cdot \mu_\sigma - 0.5 \cdot \eta). \quad (12)$$

Розрахунки граничних деформацій e_p за критерієм (9) показали, що максимально допустима величина стоншення, за якої матеріал не буде руйнуватись, для листових заготовок із сталі 10 за заданих умов формозмінення не перевищує $e_p \leq 0,35$ за радіуса робочої поверхні ролика $R_{рол}=1,5$ мм і $e_p \leq 0,26$ за $R_{рол}=4$ мм. Для заготовок із сплаву алюмінію АД1 максимально допустима величина стоншення не перевищує $e_p \leq 0,60$ за $R_{рол} = 1,5$ мм і $e_p \leq 0,50$ за $R_{рол}=4$ мм.

Для досліджених товщин листових заготовок $\delta = 0,8$ мм, $\delta = 1,0$ мм, $\delta = 1,2$ мм максимально допустима величина стоншення практично не залежить від товщини заготовки.

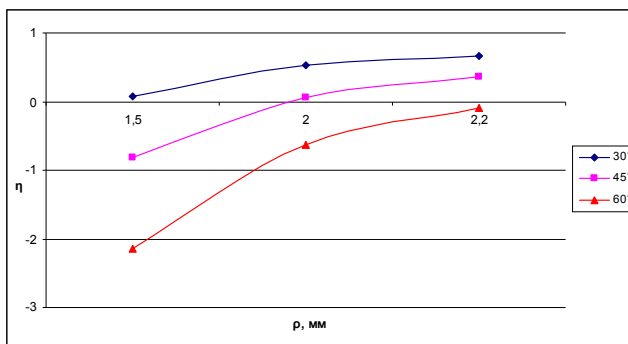


Рис. 7. Розподіл показника напруженого стану η в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α за товщини заготовки $\delta=1,2$ мм

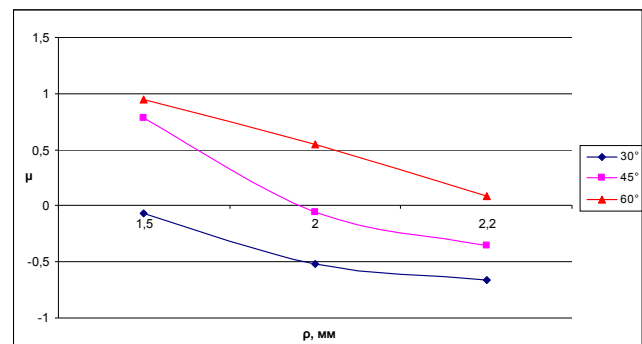


Рис. 8. Розподіл параметра Надаї-Лоде μ_σ в осередку деформації залежно від радіуса ρ і кута α за товщини заготовки $\delta=1,2$ мм

Висновки

Установлено, що під час ротаційної витяжки листових заготовок з ростом товщини заготовки показник η зменшується, а параметр Надаї-Лоде μ_σ зростає. При збільшенні радіуса робочої поверхні ролика показник η в осередку деформації також зростає, а параметр Надаї-Лоде μ_σ зменшується незалежно від товщини. Необхідно зазначити, що матеріал заготовки не впливає на характер розподілу показників η і μ_σ в осередку деформації. Величина використаного ресурсу пластичності ψ в осередку деформації зростає зі збільшенням радіуса робочої поверхні ролика $R_{рол}$ і мало залежить від товщини заготовки за інших таких самих умов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Маленичев А. С. Взаимосвязь конструктивных характеристик оборудования и технологической оснастки для ротационной вытяжки с параметрами качества получаемых изделий / А. С. Маленичев // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – 2000. – С. 215 – 221.
2. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Могильный Н. И. – М. : Машиностроение, 1983. – 190 с.
3. Трегубов В. И. Силовые режимы ротационной вытяжки цилиндрических деталей на специализированном оборудовании / В. И. Трегубов, С. П. Яковлев, С. С. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2005. – № 1. – С. 17 – 23.
4. Дудка Д. В. Ротационное формоизменение конических деталей из анизотропных материалов / Д. В. Дудка, С. С. Яковлев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – С. 3 – 11.
5. Драбик А. Н. Ротационная вытяжка конических деталей из анизотропных заготовок : дис. ... канд. техн. Науків праці ВНТУ, 2014, № 4

наук : 05.03.05 / Драбик Андрей Николаевич. – Тула, 2010. – 207 с.

6. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / Огородников В. А. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.

7. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.

8. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Смирнов-Аляев Г. А. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.

9. Капорович В. Г. Производство деталей из труб обкаткой / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1978. – 166 с.

10. Сивак И. О. Пластичность металлов при объемном напряжённом состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбовская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – 2007. – С. 73 – 76.

Сивак Іван Онуфрійович – д. т. н., професор, завідувач кафедри технології та автоматизації машинобудування, sivak_i_o@mail.ru.

Сухоруков Сергій Іванович – к. т. н., доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування, ssergeii@ukr.net.

Шевчук Євген Ігорович – аспірант кафедри технології та автоматизації машинобудування, Shevae_111@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.