

**БАГАТОЛЕЗОВЕ АДАПТИВНЕ ОСНАЩЕННЯ:
ТЕХНІКО-ЕКОНОΜΙΧΝΙ ΠΟΚΑΖΝΙΚΙ**

Представлено основні техніко-економічні показники багатолезового оснащення з кінематичними міжінструментальними зв'язками, які забезпечують компенсацію зусиль, що викликають визначальні деформації технологічної системи. Наведені кількісні оцінки доцільності використання багатолезової адаптивної обробки порівняно з однорізцевою.

Для лезової обробки розв'язання задач підвищення продуктивності та якості можна досягнути регулюванням параметрів формоутворення і зміною конструктивних, жорсткісних, інерційних характеристик верстатів та інструментального оснащення, їх демпфуючих властивостей. Процес керування параметрами формоутворення можна здійснювати на основі створення верстатно-інструментального оснащення, в тому числі багатолезового, конструкція якого передбачає відносні рухи його елементів. Регулювання досягається за рахунок узгоджених рухів елементів багатолезового оснащення з кінематичними міжінструментальними зв'язками (КМІЗ).

Впровадження в схеми різання КМІЗ кардинально змінює їх зміст. При цьому обробка стає багатолезовою, зв'язок між лезами – адаптивним, а кожне лезо отримує додатковий формоутворюючий рух $\partial D_{si}(i = 1, 2, \dots)$, який пов'язаний із рухом адаптивного механізму кінематичного міжінструментального зв'язку.

Основний ефект цих технологічних схем передбачає вирівнювання складових сил різання, що діють на ріжучі елементи і викликають визначальні деформації системи ВПД (переважно в радіальному напрямку) за рахунок вирівнювання складових сил, що мають однаковий напрямок із напрямком подачі (переважно осьових складових). На основі технологічних схем обробки із КМІЗ розроблено відповідне багатолезове оснащення [1, 2].

Для оцінки ефективності використання такого багатолезового адаптивного оснащення доцільно порівняти його основні техніко-економічні показники із однойменним для однолезової обробки жорстким інструментом, як традиційної і найчастіше застосовуваної. При цьому найважливішою вимогою до оснащення є забезпечення оптимального співвідношення між параметрами точності обробки і жорсткості та продуктивності оснащення.

Підвищення статичної точності обробки з допомогою багатолезового оснащення із КМІЗ можна оцінити порівнянням однойменних макропохибок оброблюваної деталі в радіальному, а також у повздовжньому напрямках.

Зокрема, при токарній обробці в центрах вала малої жорсткості величину макропохибки в напрямку, перпендикулярному до оброблюваної поверхні, можна виразити формулою [3]:

$$y_1 = P_y \cdot \frac{j_\partial + j_\epsilon}{j_\partial \cdot j_\epsilon} = P_y \cdot \frac{j_\partial / j_\epsilon + 1}{j_\partial},$$

де j_∂ та j_ϵ – жорсткість деталі при положенні різця посередині оброблюваної заготовки; j_ϵ – сумарна жорсткість верстату.

В той же час при використанні багатолезового оснащення із КМІЗ при паралельному точінні за методом поділу подачі із тією ж продуктивністю різання досягається значення макропохибок [4]:

$$y_N = \frac{P_y}{n} \cdot \frac{1}{j_k},$$

де j_k – жорсткість каретки з ріжучим елементом, n – кількість ріжучих елементів.

Припустимо, що величина жорсткості каретки становить 80 % жорсткості j_{cn} супорта, і що співвідношення жорсткості j_{cn} та жорсткості верстату j_ϵ порядку 1,75. Тоді отримаємо, що підвищення точності обробки в радіальному напрямку при цьому матиме вигляд:

$$X_p = \frac{y_1}{y_N} = 1,4 \cdot n \cdot \frac{j_\partial / j_\epsilon + 1}{j_\partial / j_\epsilon}. \tag{1}$$

© І.В. Луців, 2001

Найбільш ефективною є обробка при малих значеннях j_∂ / j_ϵ , але навіть при значній жорсткості дета-

лі $j_\partial / j_\epsilon > 1$ підвищення точності обробки в радіальному напрямку є досить значним (рис. 1).

Ζμίννις ζορςκόςι ριςτεμς ρερατ – ρριςτосування – ίνструмент – δεταλς ρεζορς κοορδινατς ζο-
 νη οβροβκι ρποτσορςε φορμς δεταλς, ζοκρεμα, ζορςκς κιλίндρική δεταλς, ζο οβροβκείτς ρ κεντρας
 οδνιμ ρίζεμ, οτριμυέτς κορςετνου, α ποδατλις κιλίндρική δεταλς ριαρκείτς βοκκοποδίβνου. Ρί-
 ζνις δίαμετρών δεταλς ηα κίνςι, τοβτο βίλια ζαδνύο κεντρου, ί ποςερεδινί ρνςλίδοκ ποδατλιςοτς κεντρών
 δορβίνοις [5]:

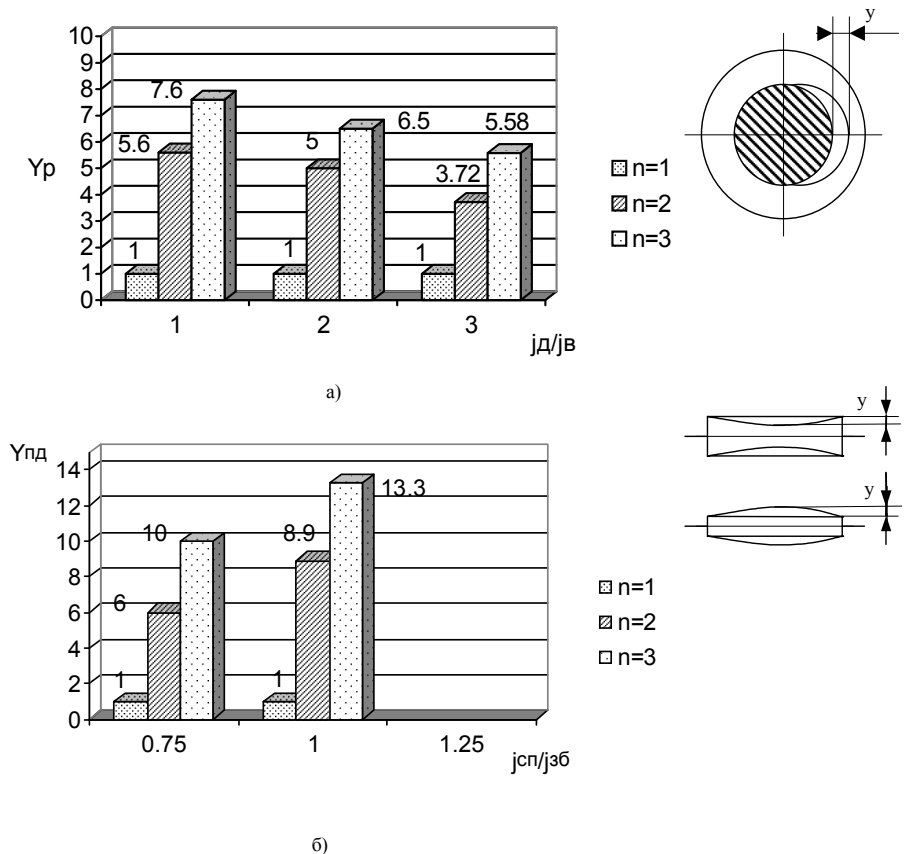
$$y_I^{nd} = \frac{P_y}{2} \left(\frac{3}{j_{3\beta}} - \frac{1}{j_{n\beta}} \right),$$

δε $j_{3\beta}$ τα $j_{n\beta}$ – ριδποδίβνο ζορςκόςι ζαδνύο ί ρερεδνύο κεντρών.

Βελιθινα y_I^n ριζνακεί ρτατιθνυ μακροποхиβκς ρ ροζορςκίμνου ηαρμυκς οδνορίζεοεί οβροβκι ραλα
 ρ κεντρας τοκαρνου ρερατου.

Δια τοκαρνις ρερατις, ζγίδνο ζ [5], ρικονουέτς ρίββίδνοηηη $j_{3\beta}/j_{n\beta} = 0,78$. Ριδποδίβνο, οδερζι-
 μο:

$$y_I^{nd} = 1,11 \cdot \frac{P_y}{j_{3\beta}}$$



Ρις. 1. Ριδβιςζεννίς τοθνόςι οβροβκι ρ ραδίαλνου (α) ί ροζορςκίμνου (β) ηαρμυκας

Β κρωςου ριπαδκς ρτατιθνυ μακροποхиβκς ρ ροζορςκίμνου ηαρμυκς ρρι ρικορςιςτάννι βαγατολεζο-
 ρου οςναηηη δορβίνοις ζυλο.

Αλε ρραοεμο, ζο ρρι ρερεμίςθεννί ρζορςκίμνυ δεταλς ηαβεδνα ζορςκίμνυ κερετκι ίζ ρίζυθιμ ελεμεντομ
 μοκε ζμίνοατίς, ρριθομυ ρίζεμομ δε οαγας κραινίη ριπαδκς, κολι ριδνοηηηη μίνιμάλνοης ζορςκόςι-
 κερετκι δεο μακςιμάλνοης ρτανοβίτς $j_{κμιν}/j_{κμακς} = 0,8$. Τοδί ροζορςκίμνυ ποхиβκς οβροβκι, ρορ'ριζανα ζί ζμί-
 νου ζορςκόςι ριςτεμς ρρι βαγατολεζοου ρίζαννί ίζ ΚΜΙΖ υ ριπαδκς τοθίννιη ρτανοβίτς:

$$y_N^{nd} = \frac{P_y}{n} \left(\frac{1}{j_{κμιν}} - \frac{1}{j_{κμακς}} \right) = \frac{P_y}{n} \frac{1}{j_{κμιν}} \cdot 0,2.$$

Ρριρυςκαουθι, ζο ζορςκίμνυ κερετκι ρτανοβίτς 0,8 ζορςκόςι ρυπορτα, οτριμαιομ, ζο ριδβιςζεννίη
 τοθνόςι βαγατολεζοοεί οβροβκι ρορβίνιηο ίζ οδνορίζεοβιμ τοθίννιημ μοζνς ριαρζιτς ρίββίδνοηηηημ:

$$Y_{nd} = \frac{y_I^{nd}}{y_N^{nd}} = 4,44n \frac{j_{cn}}{j_{зб}} \tag{2}$$

Таким чином, у випадку рівності жорсткостей супорта і заднього центру отримаємо, що статична величина макропохибок вздовж осі деталі при дволезовому адаптивному точінні зменшиться приблизно у 8,88 рази, а при трилезовому – у 13,32 рази (рис. 1). При цьому забезпечується та ж продуктивність різання, що і при однолезовому точінні жорстко закріпленим інструментом.

На формування точності оброблюваних деталей в радіальному напрямку сильно впливає змінний за периметром поверхні припуск (обробка заготовок із значним биттям, заготовок із ексцентриситетом тощо). При цьому сумарна похибка обробки складається зі статичної похибки, що визначається деформацією заготовки під дією усталеної сили різання і динамічної похибки, яка викликана зміною цієї сили.

При *n*-лезовій самоналаджувальній обробці із КМІЗ (маємо на увазі точіння за методом поділу подачі) заготовки, умовно змодельованої *k*-гранником з певним ексцентриситетом, динамічна похибка є такою, що її співвідношення з однойменною динамічною похибкою при однорізцевому точінні такої ж заготовки можна представити такою формулою [6]:

$${}^n H = \rho \sqrt{\frac{\rho^2 + \varepsilon_y^2}{(1 - \rho^2)^2 + \varepsilon_y^2 \rho^2}} \cdot {}^n f_k,$$

де ρ – співвідношення частоти коливання товщини зрізу внаслідок зміни припуску і частоти власне врівнювального механізму в процесі різання, а ε_y характеризує демпфуючі властивості цього механізму. Величина коефіцієнту ${}^n f_k$ залежить від кількості лез, що одночасно беруть участь в роботі і для дволезової обробки дорівнює 2, а для трилезової – 1,5. Крім того, для дволезової обробки при $k = 2, 4, 6, \dots$ і для трилезової обробки $k = 3, 6, \dots, {}^n f_k = 0$.

Співвідношення $\varepsilon_y/\rho = \beta_y$, тоді підвищення динамічної точності при багатолезовій обробці із КМІЗ порівняно з однолезовою можна виразити такою величиною:

$$Y_{дин} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\rho^2} - 1\right)^2 + \beta_y^2}{1 + \beta_y^2}} \cdot \frac{1}{{}^n f_k} \tag{3}$$

Найбільш поширеними при токарній обробці є такі частоти обертання шпинделя, при яких $\rho = 0 \dots 0,4$ і відповідно при цьому $\beta_y = 10 \dots 2,5$. Аналізуючи залежність, можна помітити, що при цьому можна досягнути підвищення динамічної точності обробки з використанням оснащення із КМІЗ більше, ніж у 6 разів (рис. 2). Побудова діаграми здійснена за умови, що $\varepsilon_y = \text{const}$.

Впровадження в систему обробки кінематичного міжінструментального зв'язку суттєво впливає на продуктивність різання, яка безпосередньо залежить від основного технологічного часу.

При обробці за методом поділу подачі при точінні розрахунковий коефіцієнт підвищення продуктивності багатолезового самоналаджувального різання порівняно з однорізцевим за умови забезпечення заданої точності обробки деталі в радіальному напрямку можна виразити такою формулою [7]:

$$v_{prod} = n^{0,4} \sqrt{\frac{j_k}{j}},$$

де *n* – кількість одночасно ріжучих лез; j_k – жорсткість каретки багатолезового оснащення, в якій закріплено різець; *j* – жорсткість технологічної системи при однорізцевому точінні. Так як величина *j* при обробці маложорстких деталей в першу чергу визначається жорсткістю заготовки, то в цьому випадку збільшення продуктивності найбільш доцільно.

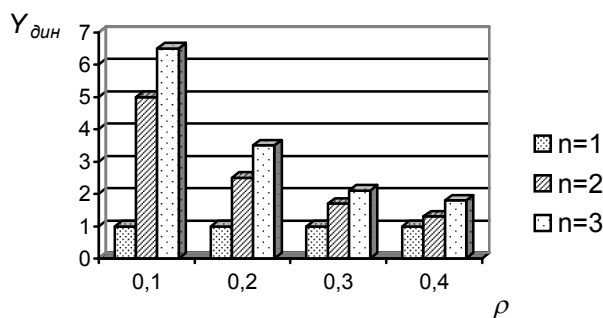


Рис. 2. Динамічна точність багатолезового оснащення

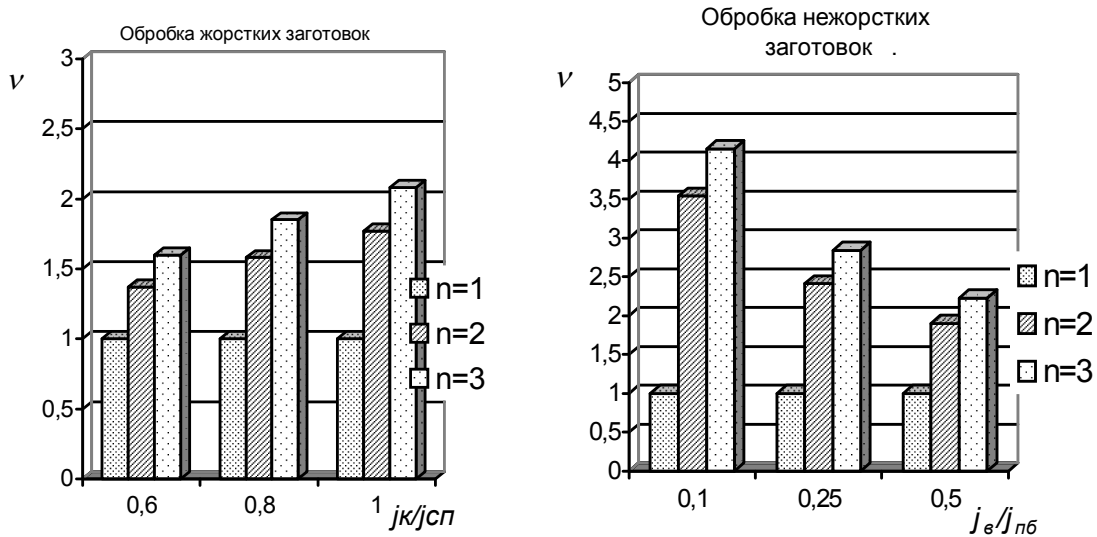


Рис. 3. Порівняльна продуктивність різання при багатолезовій обробці

Границю вібростійкості при однорізцевому точінні можна оцінити за такою формулою:

$$l_{k_p} = \frac{1}{\mu_{mp} \cos^2 \varphi} H_y \left(\omega^2 T_p + \frac{H_y}{M_y} + \frac{1}{T_p} \right),$$

де T_p – постійна часу стружкоутворення при однорізцевому точінні. Так як $T = (1/n)T_p$, то співвідношення між граничними глибинами різання при багатолезовому самоналаджувальному точінні і традиційній однорізцевій обробці наближено можна оцінити за такою залежністю:

$$\beta = \frac{n t_p^{ap}}{l_{k_p}^{ap}} = \frac{n k_p}{l_{k_p}} \approx \frac{1 + \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{T_p}{T_x} \right)}{2} \cdot \frac{n}{\omega^2 T_p^2 + 1} \cdot \frac{h_x}{H_y} \times \alpha_n \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \omega^2 T_x T_p}{n \cdot \alpha_n^2}} \right), \quad (6)$$

де

$$\alpha_n = -q \frac{m}{M_y} \left(1 + \frac{T_p}{n T_x} \right) + 1 + \frac{1}{n} \omega^2 T_p T_x.$$

Величина β характеризує відносне зростання такої важливої характеристики верстатної системи як вібростійкість при використанні багатолезового оснащення із КМІЗ.

Із врахуванням того, що $T_p = \xi(s/v) \sin(\varphi)$, де ξ – усадка стружки, s – подача супортної групи, v – швидкість різання, на рис. 4 наведені порівняльні діаграми коефіцієнта зростання вібростійкості при різних значеннях s . При цьому $h_x/H_y = 2$; $m/M_y = 0,027$; $\omega = 0,816 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$; $T_x = 10^{-3} \text{ c}$; $v = 1 \text{ м/с}$.

Аналіз діаграм показує, що зі збільшенням загальної подачі ефективність використання багатолезового оснащення із КМІЗ зменшується. Тому збільшення продуктивності різання слід досягати, в першу чергу, за рахунок багатолезової обробки із більшими глибинами, або ж комбінуючи збільшення глибини різання і подачі.

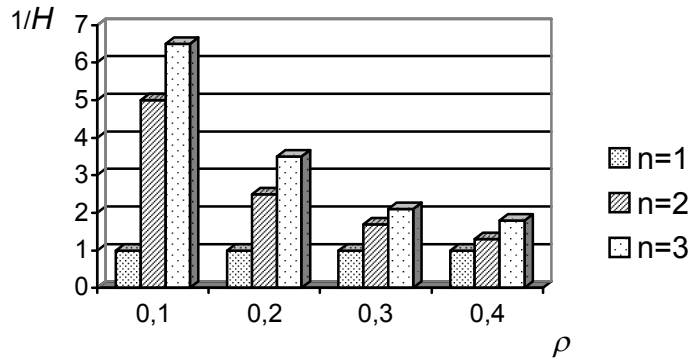


Рис. 4. Підвищення вібростійкості багатолезової обробки із КМІЗ порівняно із однорізцевим точінням

Надзвичайно важливими характеристиками якості оброблюваної поверхні є шорсткість і хвилястість. Процес виникнення мікронерівностей з геометричних причин є копіювання на обробленій поверхні траєкторії руху і форми ріжучих лез. При однорізцевому точінні висоту мікронерівностей можна оцінити за такою формулою: $R_z = s^2/8r$, де s – подача супорта, а r – радіус заокруглення вершини різця. Функціонування вирівнюючого механізму КМІЗ багатолезового оснащення в процесі різання через коливання подач ріжучих елементів призводить до того, що шорсткість оброблюваної поверхні стає неоднорідною. При цьому для дволезової адаптивної обробки із КМІЗ найбільшу (максимально можливу) висоту геометричних мікронерівностей можна оцінити за виразом [9]:

$$(R_{z\max})_{II} = \left(\frac{s}{8r} \right) \left(\frac{s}{4} + s_{af}^{\max} \right),$$

а для n -лезової обробки доцільно користуватись такою формулою:

$$(R_{z\max})_n = \left(\frac{s}{4rn} \right) \left(\frac{s}{2n} + s_{af}^{\max} \right),$$

де s_{af}^{\max} – найбільший пік зміни подачі від усередненого значення.

Таким чином, підвищення точності на мікрорівні багатолезової обробки із КМІЗ порівняно із однорізцевим точінням можна обчислити так:

$$\text{для } n = 2 \quad H_{II} = 4k^*/(4+k^*); \text{ для } n = 3 \quad H_{III} = 9k^*/(12+k^*), \tag{7}$$

де $k^* = s/s_{af}^{\max}$, причому $k^* \geq 1$.

Відповідні діаграми представлені на рис. 5. Їх аналіз показує, що при дволезовій обробці шорсткість обробленої поверхні можна зменшити щонайменше в 1,33 раза, а при трилезовій – більш, ніж в 1,8 раза.

При виникненні коливань в системі ВПД внаслідок нерівностей, що виникли при попередній обробці, на поверхні деталі можуть утворюватись хвилі (явище “спадковості”). При цьому, зокрема, при однолезовій традиційній обробці можуть виникнути резонансні вимушені коливання, максимальне значення амплітуди яких можна обчислити за даною формулою [9]:

$$y'_{\alpha\max} = \frac{k_y s t_\alpha}{H_y \sqrt{(C_y + k_p s) / M_y}},$$

де t_α – висота хвиль від попередньої обробки, k_p – коефіцієнт різання; H_y , C_y , M_y – наведені коефіцієнти демпфування, жорсткості та маса пружної системи верстата.

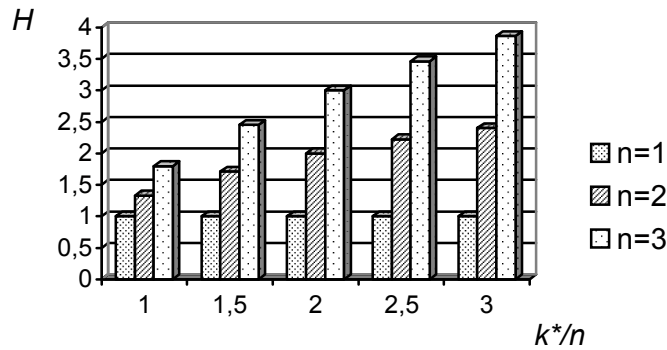


Рис. 5. Зменшення шорсткості поверхні при багатолезовій обробці з КМІЗ

Ця величина визначає максимальний розмір хвиль на поверхні деталі. Очевидно, що умовою стійкості є $y_{\alpha \max}^1 \leq t_{\alpha}$. Відповідно при використанні багатолезового оснащення із КМІЗ величину хвиль можна представити такою залежністю [10]:

$$y_{\alpha \max}^n = q\sqrt{2}\sqrt{1 - \cos \psi_s} k_y (s/n) \frac{t_{\alpha}}{\left(H_y \sqrt{C_y / M_y} \right)},$$

де q – коефіцієнт (при $n = 2, q = 2$; при $n = 3, q = 1,5$); $\psi_s = \arctg(\omega T_p/n)$ – фазовий кут запізнення, ω – частота обертання деталі, а T_p – постійна часу стружкоутворення при однорізцевій обробці.

Таким чином, коефіцієнт динамічного послаблення хвилястості при багатолезовому самоналагоджувальному різанні можна виразити так:

$$H_{x6} = \frac{y_{\alpha \max}^I}{y_{\alpha \max}^n} = \frac{n}{q} \sqrt{\frac{C_y + k_p s}{C_y}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \cos \psi_s}}. \tag{8}$$

Відповідні діаграми для випадку $T_p = 10^{-3}$ с у функції жорсткості пружної системи верстату представлені на рис. 6. Вони показують можливість зменшення хвилястості порівняно із традиційним однорізцевим точінням у 2...2,5 рази при дволезовому різанні та у 2,7...3,4 при трилезовій обробці.

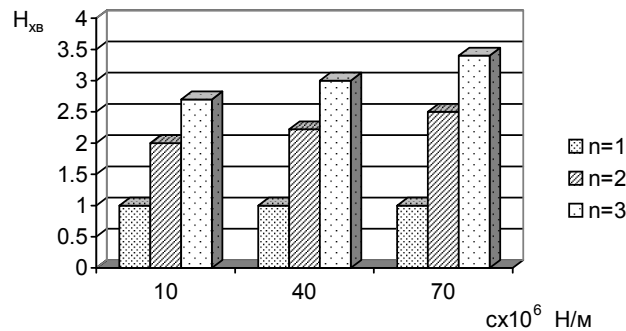


Рис. 6. Послаблення хвилястості при багатолезовій обробці і КМІЗ

Проведений порівняльний аналіз техніко-економічних показників адаптивної багатолезової і традиційної однолезової обробки підтверджує доцільність широкого використання механізмів кінематичних міжінструментальних зв'язків для отримання поверхонь за допомогою різання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Нагорняк С.Г., Луців І.В.* Предохранительные механизмы металлообрабатывающего оборудования. – К.: Техніка, 1992. – 72 с.
2. *Луців І.* Структурний синтез багатолезового оснащення з кінематичними міжінструментальними зв'язками // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 1997. – Т. 2. – Число 1. – С. 78–84.
3. *Соколовський А.П.* Жесткость в технологии машиностроения. – М.: Машгиз, 1946. – 267 с.

4. *Нагорняк С.Г., Луцив И.В.* Точение ступенчатых валов с автоматическим устранением их прогибов при обработке // Вестник машиностроения. – 1984. – № 9. – С. 42–45.
5. Детали и механизмы металлорежущих станков. Т. 1 / Под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 664 с.
6. *Луцив І.* Амплітудно-частотні характеристики самоналагоджувального верстатно-інструментального оснащення при багатолезовій обробці // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – Вип. 6. – С. 33–37.
7. *Луцив І.В.* Продуктивність різання при багатолезовій обробці з самоналагодженням. // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 9 / Технічні науки. – С. 116–119.
8. *Луцив І., Броцак І.* Розрахунок областей вібростійкості для багатолезового самоналагоджувального різання//Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 1999. – Т. 4. – Число 2. – С. 51–58.
9. *Тлусты И.* Автоколебания в металлорежущих станках. – М.: Машгиз, 1956.
10. *Луцив І.* Формування шорсткості і хвилястості поверхні при багатолезовій адаптивній обробці //Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 1999. – Т. 4. – Число 3. – С. 135–139.

ЛУЦІВ Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, проректор з навчальної роботи Тернопільського державного технічного університету, завідувач кафедри верстатно-інструментальних систем автоматизованого виробництва.

Наукові інтереси:

- створення і дослідження верстатно-інструментального оснащення для лезової обробки;
- машинознавство.

Подано 02.10.2000

Луців І.В. Техніко-економічні показники багатолезового адаптивного оснащення

Луцив И.В. Техничко-экономические показатели многолезвийной адаптивной оснастки

Lutsiv I.V. Technical and economic characters of multiedge adaptive accessories

УДК 621.9

Техничко-экономические показатели многолезвийной адаптивной оснастки / И.В. Луцив

Представлены основные технико-экономические показатели многолезвийной оснастки с кинематическими межинструментальными связями, которые обеспечивают компенсацию усилий, вызывающих определяющие деформации технологической системы. Приведены количественные оценки целесообразности использования многолезвийной адаптивной обработки по сравнению с однорезцовой.

УДК 621.9

Technical and economic characters of multiedge adaptive accessories / I.V. Lutsiv

The main technical and economic characters of multiedge accessories with kinematic intertool links guaranteeing the compensation of forces deforming the technological system are discussed. The quantitative estimates of using of multiedge adaptive machining as compared with singleedge cutting are given.