

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.914

М.Л. Білявський, І.В. Кузьо, Ю.П. Шоловій  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра механіки та автоматизації машинобудування

## МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ НЕОБХІДНОГО РЕЛЬЄФУ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ЕНЕРГООЩАДНИХ МАШИН КОМБІНОВАНИМ ТОРЦЕВИМ ФРЕЗЕРУВАННЯМ

© Білявський М.Л., Кузьо І.В., Шоловій Ю.П., 2012

**Запропонована математична модель, яка розв’язує задачу формування необхідного рельєфу поверхні, обробленої комбінованим торцевим фрезеруванням, з метою забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей виробу.**

**Mathematical model which allows to solve a problem necessary relief formation the surface processed by the combined face milling for the purpose of maintenance of necessary operational properties of a product is offered.**

**Вступ.** У процесі переоснащення вітчизняної промисловості велика увага приділяється машинобудуванню, прогрес у якій нероздільно пов’язаний з вдосконаленням технології виробництва машин. Розвиток машинобудування характеризується збільшенням потужності, швидкості, продуктивності, точності машин, збільшенням вимог до їх основних параметрів і тривалості зберігання якості виробів у заданих умовах експлуатації. Цей процес закономірний і тому проблеми підвищення якості та надійності машинобудівної продукції мають першочергове значення.

Відомо, що машини, які конструктивно однакові і виготовлені з одних матеріалів, часто мають різну надійність. Причинами такого становища у багатьох випадках є різні технології виготовлення їх деталей і передусім на фінішних операціях, під час яких формуються кінцеві властивості і стан робочих поверхонь, що визначає їх експлуатаційні показники.

**Аналіз публікацій.** Сьогодні, як показує світовий досвід [1–23], пріоритетним напрямом розвитку науково-технічного прогресу у машинобудуванні є впровадження прогресивних технологій. Особливе значення має вдосконалення технології механічної обробки, тому що такі процеси становлять понад 40 % від загальної трудомісткості виготовлення машин, причому 80 % деталей підлягають механічній обробці [4, 5, 8, 9, 11, 12, 14–16].

Слід відзначити, що з вдосконаленням машин, обсяг механічного оброблення збільшуватиметься та орієнтуватиметься на область фінішних методів обробки. При цьому точність і якість пов’язані із застосуванням нових, ефективних процесів обробки, зокрема з використанням інструментів з надтвердих матеріалів, а також комбінованих фізико-механічних методів. Провідне місце серед комбінованих методів механічної обробки належить технології різання з попереднім пластичним деформуванням [1, 2, 7, 10, 11, 13, 17–20]. Питанням розробки технологічного методу різання з попереднім пластичним деформуванням розглядають роботи Подураєва В.М., Ярославцева В.М., Полянчикова Ю.М., Амбросімова С.К., Резанова А.І., Наумова Б.І., Усачова Я.Г., Кодрика А.І., Крайнева Д.В., Меламада В.І., Давидюка В.І., Посвятенка Е.К. та ін. Згадана технологія набула широкого поширення на операціях точіння, стругання, протягування [10, 11, 13, 17–

20]. Як свідчить аналіз літературних джерел, сьогодні відсутні конструкторсько-технологічна документація, яка стосується питань впровадження розглядуваної технології на операціях торцевого фрезерування та використання надтвердих матеріалів і мінералокераміки як інструментального матеріалу різальних елементів. Крім того, потенціал наукових досягнень всесвітньо-відомих учених Новікова М.В., Мельничука П.П., Розенберга О.О., Клименка С.А., Лоєва В.Ю. [4, 5, 8, 9, 11, 12, 14–16] та інших в галузі технологічного забезпечення якості обробки плоских поверхонь залізвуглецевих сплавів торцевим фрезеруванням інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, свідчить про пошук шляхів підвищення ефективності обробки сталей з аустенітною структурою та відхід від дискретних методів обробки і сполучення в одній операції різання та поверхневого пластичного деформування. Дослідження можливої ефективності впровадження технології різання з попереднім пластичним деформуванням на операціях торцевого фрезерування нерозривно пов'язано з розробленням теоретичних положень.

**Мета роботи** – розробити математичну модель формування рельєфу плоскої поверхні обробленої торцевим фрезеруванням з попереднім пластичним деформуванням з метою оптимізації режимів комбінованої обробки та підвищення якості оброблених поверхонь.

Розглянемо технологічну систему, показану на рис. 1.

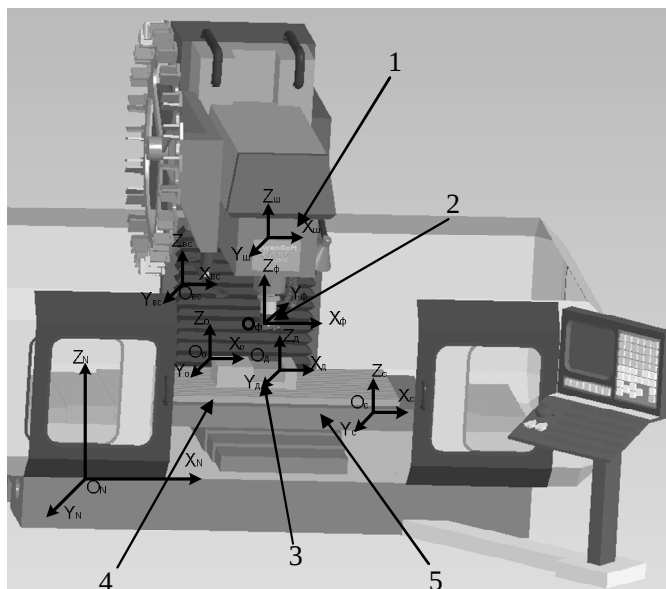


Рис. 1. Технологічна система: 1 – шпиндельний вузол; 2 – комбінована торцева фреза; 3 – заготовка; 4 – пристосування; 5 – стіл верстата

Досліджувана технологічна система була розкладена на елементи та встановлені зв'язки між ними, як показано нижче.

Математична модель, що описує зміну просторового переміщення формоутворювальних елементів у процесі комбінованого торцевого фрезерування плоскої поверхні, з врахуванням [3] може бути подана у вигляді:

$$\begin{cases} \bar{R}_1 = M_D^{-1} \cdot M_O^{-1} \cdot M_C^{-1} \cdot \begin{bmatrix} M_{sh} \cdot M_\phi \cdot M_\omega \cdot r_{sh} + M_\phi \cdot M_\omega \cdot r_1 - M_D \cdot M_O \cdot M_C \cdot r_D + M_O \cdot M_C \cdot r_O - \\ M_D \cdot M_O \cdot M_C \cdot S_x + r_1 - r_L \end{bmatrix}; \\ \bar{R}_2 = M_D^{-1} \cdot M_O^{-1} \cdot M_C^{-1} \cdot \begin{bmatrix} M_{sh} \cdot M_\phi \cdot M_\omega \cdot r_{sh} + M_\phi \cdot M_\omega \cdot r_2 - M_D \cdot M_O \cdot M_C \cdot r_D + M_O \cdot M_C \cdot r_O - \\ M_D \cdot M_O \cdot M_C \cdot S_x + r_2 - r_L \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\bar{R}_1, \bar{R}_2$  – відповідно просторові переміщення деформівних та різальних елементів;  $M_w$  – матриця повороту координатної системи шпинделя за законом  $w = w(t)$ ;  $S_x$  – вектор переміщень

координатної системи стола;  $M_D^{-1}, M_o^{-1}, M_c^{-1}$  – зворотні матриці поворотів координатних систем «деталь – пристосування – робочий стіл»;  $M_u, M_\phi, M_o, M_D, M_c$  – матриці поворотів координатних систем відповідно шпиндельного вузла, комбінованого інструмента, пристосування, деталі, робочого стола;  $r_u, r_D, r_o, r_\phi, r_1, r_2$  – радіус-вектори, що з'єднують початок координат нерухомої системи відповідно зі шпиндельним вузлом, деталлю, пристосуванням, деформівними та різальним елементам.

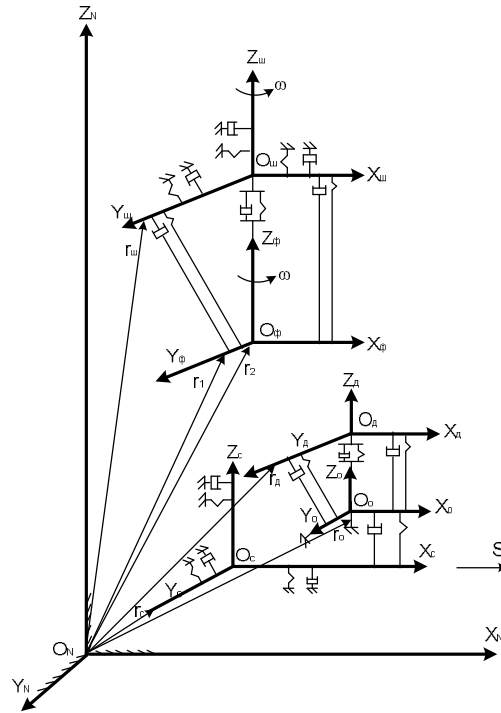


Рис. 2. Елементи технологічної системи та їх взаємозв'язок між собою

Математичну модель, яка описує просторовий рух елементів розглядуваної технологічної системи та формує матриці поворотів координатних систем, з врахуванням рекомендацій [3] представлено у вигляді диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_u \ddot{Z}_u + b_z^u \dot{Z}_u + C_z^u Z_u = -\sum_1^{m_r} P_{rz} + \sum_1^{m_d} P_{dz}; \\ m_u \ddot{Y}_u + b_y^u \dot{Y}_u + C_y^u Y_u = -\sum_1^{m_r} P_{ry} + \sum_1^{m_d} P_{dy}; \\ m_u \ddot{X}_u + b_x^u \dot{X}_u + C_x^u X_u = -\sum_1^{m_r} P_{rx} + \sum_1^{m_d} P_{dx}; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} m_\phi \ddot{Z}_\phi + b_z^\phi \dot{Z}_\phi + C_z^\phi Z_\phi = -\sum_1^{m_r} P_{rz} + \sum_1^{m_d} P_{dz}; \\ m_\phi \ddot{Y}_\phi + b_y^\phi \dot{Y}_\phi + C_y^\phi Y_\phi = -\sum_1^{m_r} P_{ry} + \sum_1^{m_d} P_{dy}; \\ m_\phi \ddot{X}_\phi + b_x^\phi \dot{X}_\phi + C_x^\phi X_\phi = -\sum_1^{m_r} P_{rx} + \sum_1^{m_d} P_{dx}; \end{array} \right. \quad (2)$$

Нижче (рис. 3) наведено приклад комбінованого торцевого фрезерування плоскої поверхні, причому у контакті із заготовкою знаходять формоутворювальні елементи № 1д-№ 5д, № 1р-№ 5р – відповідно п'ять деформівних та різальних елементів. Необхідно відзначити, що деформівні елементи знаходяться на відстані  $R_1$ , а різальні елементи – на відстані  $R_2$  від осі обертання інструмента.

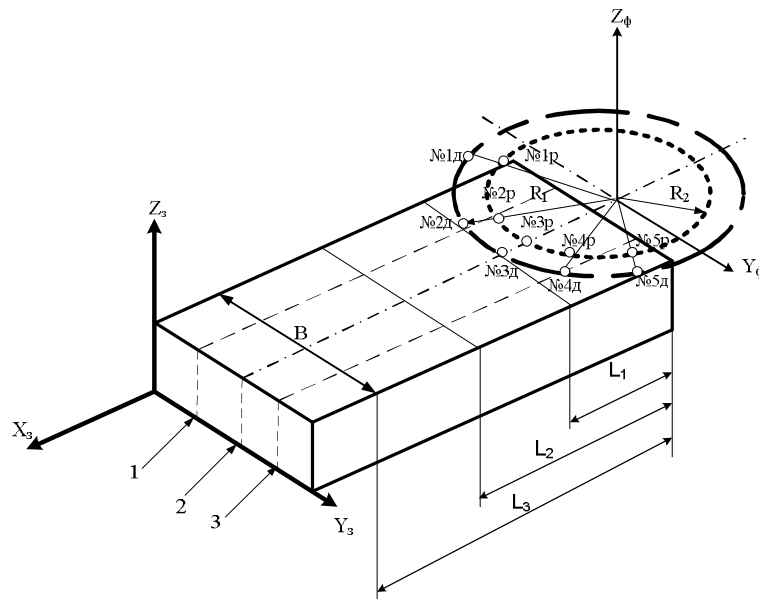


Рис. 3. Положення плоскої поверхні за комбінованого торцевого фрезерування

Враховуючи те, що в процесі фрезерування залежно від положення заготовки на робочому столі, конфігурації оброблюваної поверхні, кількості формоутворювальних елементів, які розташовані у комбінованій торцевій фрезі, змінюватиметься просторова координата точки прикладення навантаження для визначення перерахованих змінних необхідно математичні моделі (1) та (2) доповнити системою математичних залежностей:

$$\begin{cases} m_d = \frac{\psi_T^{\text{II}} - \psi^{\text{I}}}{v} = \frac{2}{v} \cdot \arcsin \frac{B}{D_d}; \\ m_r = \frac{\psi_T^{\text{II}} - \psi^{\text{I}}}{v} = \frac{2}{v} \cdot \arcsin \frac{B}{D_r}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $n$  – центральний кут між формоутворювальними елементами в загальному плані;

$$v = \frac{360^\circ}{z},$$

де  $z$  – кількість формоутворювальних елементів;  $B$  – ширина оброблюваної поверхні;  $D_r$ ,  $D_d$  – діаметри розташування відповідно деформівних та різальних елементів.

Сили різання зміцненого шару інструментом з надтвердого матеріалу запропоновано знаходити за математичними залежностями:

$$\sum_1^{m_r} P_{rx} = \frac{0,09 \sum_1^{m_d} R_{di}}{0,013 \cdot R_d^2} \left\{ S_z t_p K_2 \sum_1^{m_r} \sin \psi + m l_p (\tau_0 - \tau) \right\}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_1^{m_r} P_{ry} = & \frac{0,09 \sum_1^{m_d} R_{di}}{0,013 \cdot R_d^2} \left\{ S_z t_p K_2 \left[ \operatorname{tg}(\eta - \gamma) \sin(\phi - \beta) \sum_1^{m_r} \sin^2 \psi \pm 0,5 \sum_1^{m_r} \sin 2\psi \right] + \right. \\ & \left. + l_p (\tau_0 - \tau) \left( \frac{1}{f} \sin \phi_{cp} \sum_1^{m_r} \sin \psi \pm \sum_1^{m_r} \cos \psi \right) \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_1^{m_r} P_{rz} = \frac{0,09 \sum_1^{m_d} R_{di}}{0,013 \cdot R_d^2} \left\{ S_z t_p K_2 \operatorname{tg}(\eta - \gamma) \cos(\varphi - \beta) \sum_1^{m_r} \sin^2 \psi + l_p \cdot (\tau_0 - \tau) \cdot \frac{1}{f} \cdot \cos \varphi_{cp} \cdot \sum_1^{m_r} \sin \psi \right\}, \quad (6)$$

де  $S$  – подача на оберт інструмента або на хід стола;  $t_p$  – глибина різання;  $K_2$  – безрозмірний комплекс, який залежить тільки від переднього кута різця  $\gamma$  і усадки стружки  $\xi$  (за  $\gamma = -10^\circ$  і  $\xi \approx 1,1$ ,  $K_2 = 5,0$ );  $l_p$  – довжина робочої кромки різця, яка бере участь у видаленні шару металу;  $\tau$  – ширина фаски зносу на задній поверхні різця,  $\tau \leq 0,3$  мм;  $\tau_0$  – ширина контакту, яка обов'язково буде за відсутності зносу.

Визначивши положення заготовки у координатній системі робочого стола верстата, контур оброблюваної поверхні розбивають на ділянки, які можуть бути описані математично.

Наступним етапом у математичному моделюванні рельєфу обробленої поверхні за комбінованого торцевого фрезерування є визначення координат точок контакту фрези з лініями контуру оброблюваної поверхні заготовки. Для цього достатньо розв'язати систему рівнянь розглядуваної ділянки контура оброблюваної заготовки та рівняння руху комбінованої торцевої фрези. Після чого переходимо до пошуку реакцій в кожній опорній точці. З врахуванням вищенаведеного, розглянемо загальний випадок розрахунку реакцій в опорних точках. Нехай на  $Q$ -ту координатну систему діють сили  $P_1 \dots P_n$  – система сили на кожному формоутворювальному елементі, що знаходиться у фіксований момент часу у зоні формоутворення;  $G$  – маса деталі, на якій побудована  $Q$ -та координатна система.

Для того, щоб знайти реакції в опорних точках  $Q$ -ї координатної системи, визначимо головний вектор  $\bar{R}$  та головний момент зовнішніх сил  $\bar{W}$  стосовно її початку з врахуванням [3]:

$$\begin{cases} \bar{R}_Q = R_{xQ} + R_{yQ} + R_{zQ}; \quad \bar{W}_Q = W_{xQ} + W_{yQ} + W_{zQ}, \\ R_{xQ} = \sum_{j=1}^n P_{dxj} + P_{rxj} + G_{xQ}; \quad W_{xQ} = \sum_{j=1}^n (P_{rxj} z_j - P_{rzj} x_j) + (P_{dxj} z_j - P_{dzj} x_j) + G_{xQ} z_Q - G_{zQ} x_Q; \\ R_{yQ} = \sum_{j=1}^n P_{dyj} + P_{ryj} + G_{yQ}; \quad W_{yQ} = \sum_{j=1}^n (P_{ryj} x_j - P_{rxj} y_j) + (P_{dyj} x_j - P_{dxj} y_j) + G_{yQ} x_Q - G_{xQ} y_Q; \\ R_{zQ} = \sum_{j=1}^n P_{dzj} + P_{rzj} + G_{zQ}; \quad W_{zQ} = \sum_{j=1}^n (P_{rzj} y_j - P_{ryj} z_j) + (P_{dzj} y_j - P_{dyj} z_j) + G_{zQ} y_Q - G_{yQ} z_Q, \end{cases} \quad (7)$$

де  $x_j, y_j, z_j$  – координати точок прикладення зовнішніх сил;  $P_{rxj}, P_{ryj}, P_{rzj}, P_{dxj}, P_{dyj}, P_{dzj}$  – проекції зовнішніх сил попереднього пластичного деформування та різання;  $R_{xQ}, R_{yQ}, R_{zQ}$  – проекції головного вектора на осі координатної системи;  $W_{xQ}, W_{yQ}, W_{zQ}$  – проекції вектора головного моменту на осі координатної системи.

З врахуванням вищенаведеного складемо систему рівнянь рівноваги, з врахуванням [3]:

$$\begin{cases} R_{xQ} + \sum_{j=1}^6 N_{xQj} = 0; \quad R_{yQ} + \sum_{j=1}^6 N_{yQj} = 0; \quad R_{zQ} + \sum_{j=1}^6 N_{zQj} = 0; \\ W_{xQ} + \sum_{j=1}^6 (N_{xQj} z_{Qj} - N_{zQj} x_{Qj}) = 0; \\ W_{yQ} + \sum_{j=1}^6 (N_{yQj} x_{Qj} - N_{xQj} y_{Qj}) = 0; \\ W_{zQ} + \sum_{j=1}^6 (N_{zQj} y_{Qj} - N_{yQj} z_{Qj}) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

Отже, розв'язання системи рівнянь (7) та (8) з врахуванням (1)–(6) дає змогу визначити невідомі реакції в опорних точках плоскої поверхні, що, своєю чергою, визначає рельєф. На підставі математичних залежностей (1)–(8) був розроблений алгоритм математичного моделювання формування рельєфу обробленої плоскої поверхні комбінованим торцевим фрезеруванням (рис. 4).

**Висновки.** Розроблена математична модель уможливило на етапі проектування технологічного процесу виготовлення або ремонту відповідальних вузлів енергетичних машин, зокрема когенераційних, оптимізувати один з елементів технологічної системи «верстат – пристосування – інструмент – деталь» або режим комбінованої обробки з метою отримання поверхні із заданими показниками якості.



*Рис. 4. Алгоритм роботи математичної моделі формування рельєфу обробленої пласкої поверхні комбінованим торцевим фрезеруванням*

Слід зауважити, що розроблену математичну модель можливо оптимізувати під будь-який прогресивний комбінований інструмент для обробки плоских поверхонь.

Крім того, у подальших дослідженнях необхідно встановити взаємозв'язок між отриманою математичною моделлю формування рельєфу обробленої пласкої поверхні комбінованим торцевим

фрезеруванням та експлуатаційними показниками обробленої поверхні, а також їх впливом на загальну надійність відповідальних вузлів енергетичних машин загалом.

У подальших дослідженнях планується розробити аналогічні математичні моделі для операцій точіння та розточування, що дасть можливість провести повну оптимізацію технологічної підготовки виготовлення відповідальних вузлів енергетичних машин, зокрема когенераційних, з метою підвищення загальної надійності таких машин.

1. Амбросимов С.К. Феноменологическая модель обрабатываемости резанием с опережающим пластическим деформированием при протягивании // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. 2. Амбросимов С.К. Феноменологическая модель исследования энергосиловых затрат на резание при опережающем деформирующем протягивании с упругопластическим нагружением // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 5. 3. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1984. – 296 с. 4. Бушля В.М. Особливості глибинної обробки торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами // Вісник ЖДТУ. – 2003. – № 2 (26). 5. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ “КПІ”, 2000. – 16 с. 6. Пат. № 87360 Україна, МПК В23С3/00. Спосіб плоского фрезерування деталей з незагартованих сталей торцевими фрезами, оснащеними елементами з надтвердих матеріалів / Виговський Г.М., Громовий О.А., Білявський М.Л. – № а200710531; заявл. 24.09.2007, опубл. 10.07.2009. Бюл. № 13. 7. Грезнов И.М. Об обрабатываемости холодноволокенных калиброванных сталей 35 и 40 // Вестник металлопромышленности. – 1937. – № 10. – С. 59–64. 8. Громовий О.А. Розробка чистових косокутних торцевих фрез з комбінованими схемами різання: дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01. ЖІТІ. – К., 2002. – 172 с. 9. Карюк Г.Г. Технологические особенности механической обработки режущим инструментом из сверхтвёрдых материалов: Наук. думка, 1991. – 283 с. 10. Ковинов А.Н., Назаров Ю.Ф. Нетрадиционные методы обработки материалов: Учеб. пособ. – М.: МГОУ, 2003. 11. Крайнев Д.В. Повышение эффективности процесса резания сталей перлитного и аустенитного класса путем использования предварительного пластического деформирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Волгоград, 2006. – 167 с. 12. Лоев В.Ю. Удосконалення фінішної обробки плоских поверхонь деталей комбінуванням різання з поверхневим пластичним деформуванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Житомирський державний технологічний ун-т. – Житомир, 2005. 13. Меламед В.И., Давидюк В.И., Чагинцева А.А. Усилие резания и усадка стружки при срезании наклепанного слоя металла // Вестник машиностроения. – 1961. – № 6. – С. 147–153. 14. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь: дис. ...докт. техн. наук: 05.03.01. – К., 2002. – 456 с. 15. Новиков Н.В., Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Перспективы развития процессов лезвийной обработки инструментами, оснащёнными ПСТМ (начало) // Мир техники и технологий. – 2004. – № 8. – С. 40–43. 16. Новиков Н.В., Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Перспективы развития процессов лезвийной обработки инструментами, оснащёнными ПСТМ (окончание) // Мир техники и технологий. – 2004. – № 9. – С. 32–34. 17. Обрабатываемость холодноотянутых сталей на токарных автоматах / Е.И. Фельдишей, Б.И. Наумов, А. И. Резанов // Вестник машиностроения. – 1959. – № 3. – С. 21–24. 18. Подураев В. Н., Ярославцев В. М., Ярославцева Н.А. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения, 1971. – № 4. – С. 64–65. 19. Подураев В. Н., Ярославцев В. М., Ярославцева Н. А. Влияние обработки резанием с опережающим пластическим деформированием на предел выносливости обработанных деталей. – Изв. вузов, сер. “Машиностроение”. – 1971. – № 8. – С. 121–124. 20. Посвятенко Э.К. Исследование обрабатываемости металла, упрочненного черновым деформирующим протягиванием: автореф. ... канд. дис., КПИ. – К., 1974. – 29 с. 21. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Силы и мощность при обработке металлов торцевыми фрезами из СТМ // Сверхтвёрдые материалы. – 1988. – № 1. – С. 47–50. 22. Струтинський В. Б., Мельничук П. П. Математичне моделювання металорізальних верстатів / Житомирський інженерно- технологічний ін-т. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 570 С. 23. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. – Т.3: Резание материалов лезвийными инструментами. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с.