

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ  
СФЕРИЧНИМИ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК**

(Представлено к.т.н., проф. Юмашевим В.Є.)

*У статті розглянуто існуючі на сьогодні шляхи оптимізації обробки сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК, виконано аналіз недоліків та переваг методів підвищення ефективності обробки, виявлено актуальні напрямки в оптимізації фрезерування сферичними кінцевими фрезами.*

**Вступ.** У сучасних умовах стрімкого зростання вимог до продукції перед виробниками стоїть завдання безперервно збільшувати обсяги виробництва, покращувати якість продукції, знижуючи при цьому її собівартість. Основним шляхом вирішення такого завдання є вдосконалення технології виготовлення. В цілій низці сучасних галузей виробництв, таких як: авіабудування, автомобілебудування, виготовлення протезів та імплантатів, ювелірне виробництво та багато інших, використовуються деталі, отримання яких можливе переважно із застосуванням методу фрезерування на верстатах з ЧПК. Обробка проводиться з високим рівнем вимог до якості отриманих поверхонь, точності розмірів та властивостей поверхневого шару матеріалів деталей; як заготовки нерідко виступають унікальні та дорогі композитні матеріали, обробка яких вимагає відхилень від класичних технологій. Чистові, фінішні та часто напівчистові операції на фрезерних верстатах з ЧПК прийнято виконувати кінцевими сферичними фрезами. Різальний інструмент з такою геометрією дозволяє отримувати просторово-складні поверхні з високим рівнем їхньої якості. Невпинний рух вимагає постійного підвищення якості обробки на фрезерних верстатах з ЧПК. Для оптимізації процесу фрезерування стоїть завдання управління режимами та параметрами обробки. Важливе значення для процесу різання має вибір траєкторій обробки. Тому в даній роботі виконаний аналіз шляхів оптимізації обробки сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК.

**Мета роботи.** Проаналізувати існуючі шляхи оптимізації обробки сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК. Виявити актуальні та не вирішені остаточно проблеми, що виникають при фрезеруванні сферичними кінцевими фрезами. Визначити пріоритетні напрямки в оптимізації обробки для їх розвитку в подальшій науковій роботі.

**Викладення основного матеріалу.** Фрезерування кінцевими сферичними фрезами на верстатах з ЧПК є широко поширеним методом обробки просторово-складних поверхонь. Фасонна радіусна поверхня торця різального інструмента дозволяє з високою геометричною точністю обробляти будь-які криволінійні поверхні. Метод є відносно молодим та розвитку набув разом із поширенням обчислювальної техніки. Сьогодні фрезерування сферичними кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК є майже незамінним при виготовленні прес-форм, моделей у медичній техніці тощо.

Ціла низка особливостей потребує окремого розгляду проблем обробки сферичними фрезами:

1. Яскраво виражений характер трохіодальної траєкторії руху зуба фрези.
2. Суттєва непостійність припусків уздовж просторово-складної поверхні в силу недосконалості стратегії обробки.
3. Зміна швидкості різання вздовж криволінійної різальної кромки фрези.
4. Як наслідок пунктів 2 та 3, яскраво виражені коливання  $R_f$ .
5. Складність геометрії шару, що зрізується і, як наслідок, складність аналітичного описання процесу стружкоутворення.
6. Відносно малий період стійкості різального інструмента.

Різальна кромка фасонної торцевої частини сферичної фрези може бути плоскою або гвинтовою. Перші, в результаті простоти виготовлення та відповідної дешевизни, є більш поширеними, другі – більш стійкі до виникнення вібрацій і мають більший період стійкості [1, 2].

Обробці сферичними фрезами характерна наявність мінімального ефективного радіуса фрези, при якому відбувається різання; на менших відстанях до осі обертання процес стружкоутворення не відбувається, натомість має місце пластична деформація матеріалу заготовки [3]. Це обумовлюється малою швидкістю і, як результат, потужністю різання.

Внаслідок суттєвої нестационарності обробки сферичними фрезами похибка обробки на різних ділянках деталі може відрізнятись в рази. Для ефективної оптимізації обробки повинна бути розроблена модель процесу, яка враховуватиме нестационарність процесу різання. Частково це завдання вирішене в

роботі [4], де запропонована корекція початкової траєкторії руху ПІ з урахуванням прогнозованих похибок технологічної системи за трьома координатами у декартовій системі координат. На шорсткість обробленої поверхні в рівній мірі впливають гребінці, що утворюються від переходів, і хвилі в напрямку подачі, які утворюються змазуванням матеріалу позаду інструмента [5]. На рисунку 1 фотографії, взяті зі статті [5], демонструють шорсткість обробленої поверхні для сферичних кінцевих фрез відповідно з діаметрами 0,2 мм (кут нахилу поверхні  $70^\circ$ ) та 0,6 мм (кут нахилу поверхні  $10^\circ$ ). Чітко помітні хвилі на обробленій поверхні, що сумірні з нерівностями в результаті виникнення гребінців після проходів. Практично всі запропоновані сьогодні моделі, що прогнозують утворення шорсткості поверхні після обробки сферичними фрезами, враховують тільки гребінці на обробленій поверхні.

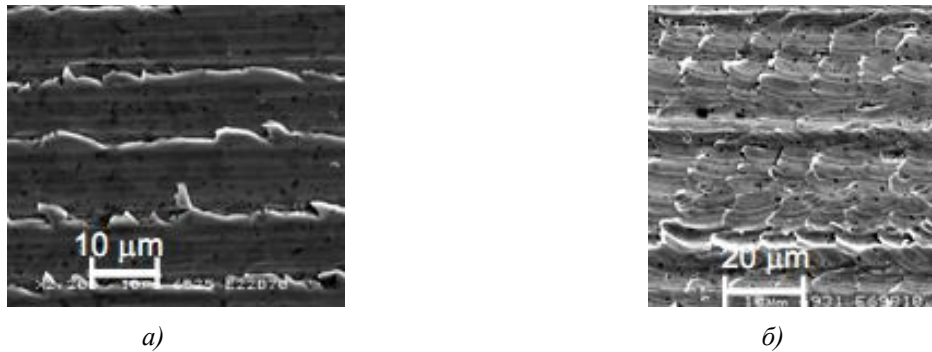


Рис. 1. Поверхня, оброблена сферичною кінцевою фрезою: діаметр фрези 0,2 мм, кут нахилу поверхні  $70^\circ$  (а); діаметр фрези 0,6 мм, кут нахилу поверхні  $10^\circ$  (б)

Для управління точністю та якістю обробки за умови рівномірного припуску виконують регулювання подачі [6]. Для цього визначається масив значень подач для забезпечення сталої шорсткості по всій криволінійній поверхні. Проте сталий припуск можливий не більше ніж в 30 % випадків обробки деталей [7], тому для випадків ступінчастого припуску в роботі [7] запропонований важчий у реалізації, проте достатньо ефективний шлях оптимізації обробки – керування не тільки величиною подачі, але й її напрямком залежно від геометрії зони обробки.

Описання зміни режимів різання вздовж криволінійної різальної кромки та прив'язка їх до геометрії поверхні деталі є першим важливим питанням, вирішення якого потребує оптимізація обробки сферичними кінцевими фрезами.

Друге питання – аналітичний опис геометрії шару, що зрізується, та шару, що не зрізується. Переріз є змінним (рис. 2) як у вертикальній площині, так і в горизонтальній. Через змінність потужності різання по довжині різальної кромки, 4- та 5-осьова обробка суттєво відрізняються від 3-осьової, оскільки в них наявні 1 чи 2 додаткові координати, що дають можливість задавати кут нахилу фрези – так звані «кут обгону» та «кут відставання» – і, таким чином, виключати з обробки ділянку сферичної частини фрези, яка не ріже, а зминає матеріал [8].

На основі міркувань іноземних вчених у роботі [3] геометрію шару, що зрізується, запропоновано аналітично представляти у вигляді двох частин відповідно з площами  $\Pi_{1,вв}$  і  $\Pi_{2,вв}$  (рис. 3). Модель визначення геометрії шару, що зрізується, є площинною. Для точного аналізу динаміки різання необхідно визначити зміну припуску в просторі за оберт фрези.

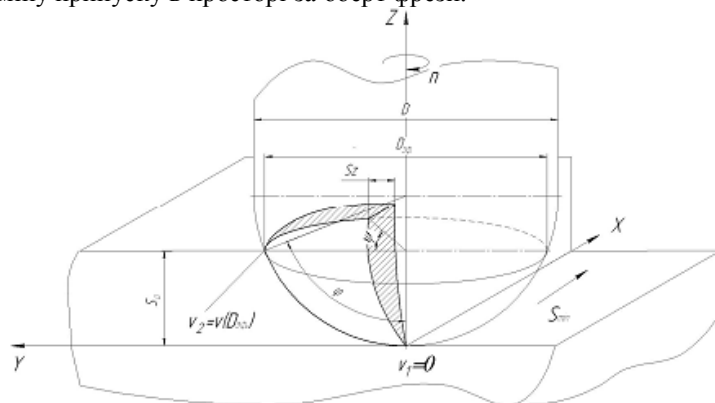


Рис. 2. Змінний переріз при обробці сферичною кінцевою фрезою

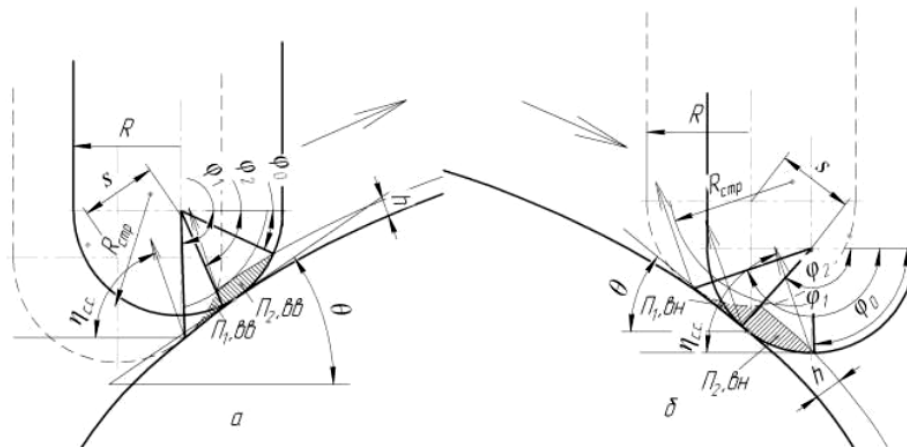


Рис. 3. Геометрія шару, що зрізується, при обробці сферичною кінцевою фрезею

Модель (рис. 4) для визначення геометрії шару, що зрізується, при обробці зі ступінчастим припуском запропонована в роботі [7].

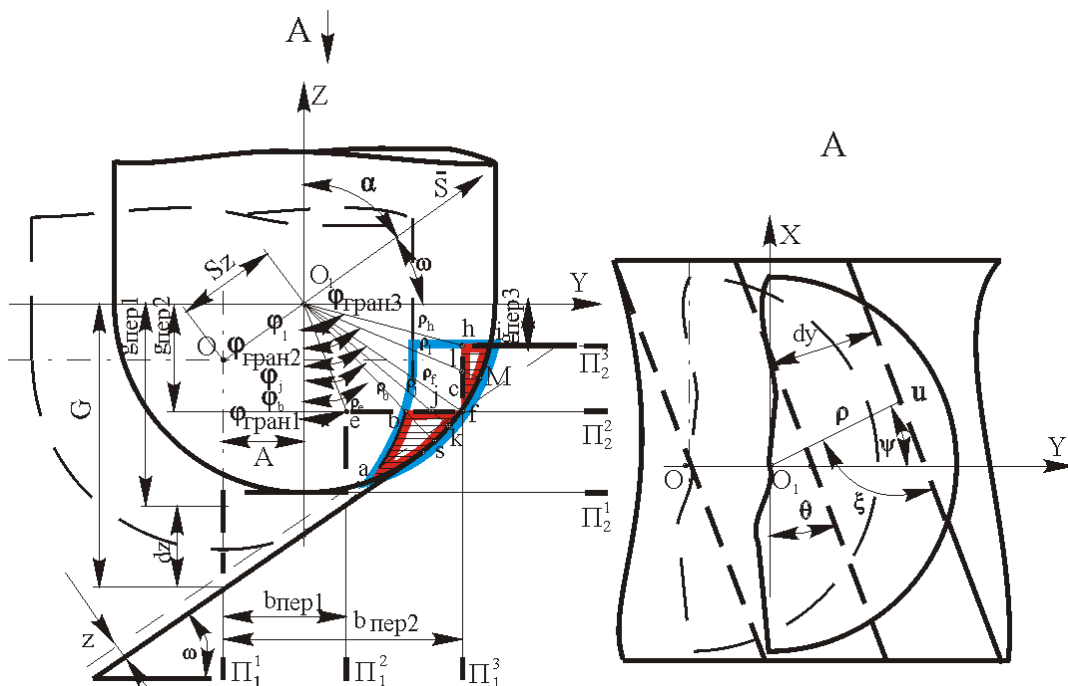


Рис. 4. Геометрія шару, що зрізується, при обробці сферичною кінцевою фрезею

Товщину шару, що зрізується, для вертикальної ділянки ( $a_1$ ) та горизонтальної ділянки ( $a_j$ ) пропонується визначати за формулами:

$$a_1 = R - ((n-2) dy + A) \frac{\sin(90-\theta) \sin \varphi_1}{\sin(\psi+\theta)}; \tag{1}$$

$$a_j = R - \frac{G - \text{tg} \omega A - dz \cdot (n-1)}{\cos \varphi_1}; \tag{2}$$

де  $R$  – радіус фрези;  $n$  – номер площини, яка утворює сходинку;  $dy$  – ширина сходинки;  $A$  – відстань, яку проходить фреза від вихідного положення з кроком подачі на зуб;  $\theta$  – кут повороту вертикальної площини;  $\varphi$  – кут профілю різальної кромки;  $\psi$  – кут контакту зуба фрези;  $G$  – відстань від початку координат до основи першої сходинки;  $\omega$  – кут нахилу поверхні, що обробляється, до площини  $XOY$ ;  $dz$  – висота сходинки.

Коли обрана модель визначення геометрії шару, що зрізується, постає питання визначення сил, що мають місце в процесі різання. Сьогодні з розвитком обчислювальної техніки є можливість достатньо точно прогнозувати сили різання, наприклад, за методом кінцевих елементів (МКЕ). Важливим та бажаним є підхід до визначення сил з огляду на динаміку процесу. Силкових моделей є багато. Чи не в

кожній окремій роботі запропонована своя модель, актуальна для конкретного випадку. Проте всі вони врешті базуються або на аналізі механіки процесу, або є енергетичними моделями – в їх основі лежить аналіз зміни енергії системи [9–13].

У статті [9] запропоновано достатньо проста експериментальна модель, яка може бути корисна для виконання оперативних наближених розрахунків. Площу зрізу  $i$ -го елемента, що розташований на різальній кромці під кутом  $\phi$  при повертанні фрези радіуса  $R$  на кут  $\theta$ , запропоновано визначати через подачу  $f_z$  за формулою:

$$\Delta a_i(\theta) = f_z \cdot \cos \phi_i \cdot \sin \theta_i \cdot R \cdot \Delta \phi \quad (3)$$

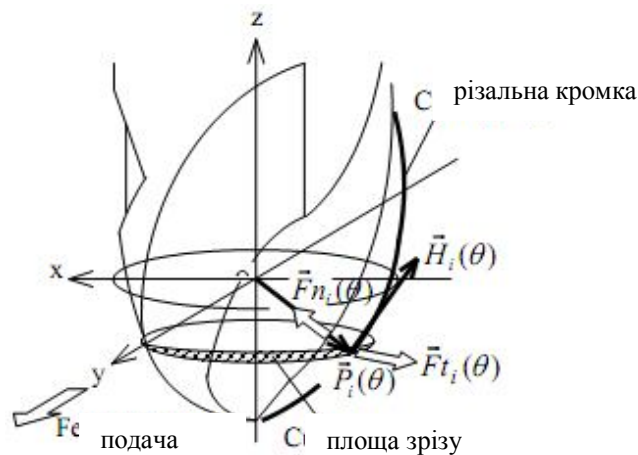


Рис. 5. Складові сили різання при обробці сферичною кінцевою фрезою

Знаючи площу зрізу, можна обчислити тангенціальну  $Ft$  та нормальну  $Fn$  складові сили різання (рис. 5) відповідно за формулами (4) та (5).

$$\overline{F_{ti}} = \frac{\overline{P_i(\theta)} \times \overline{H_i(\theta)}}{|\overline{P_i(\theta)} \times \overline{H_i(\theta)}|} \cdot (K_t \cdot \Delta a_i(\theta) + P_t \cdot R \cdot \Delta \phi); \quad (4)$$

$$\overline{F_{ni}} = \frac{\overline{P_i(\theta)}}{|\overline{P_i(\theta)}|} \cdot (K_n \cdot \Delta a_i(\theta) + P_n \cdot R \cdot \Delta \phi), \quad (5)$$

де  $K_t$ ,  $P_t$ ,  $K_n$ ,  $P_n$  – коефіцієнти різання, які визначаються матеріалами фрези та деталі, вони є емпіричними;  $\overline{P_i}$  та  $\overline{H_i}$  – одиничні вектори, що визначають напрямок дії складових сил різання. Взагалі зусилля на різальну кромку, яке має місце при обробці, визначається за сумою сил кожної з  $N$  елементарних частин:

$$\overline{F}(\theta) = \sum_{i=1}^N (\overline{F_{ti}}(\theta) + \overline{F_{ni}}(\theta)) \quad (6)$$

У роботі [14] стверджується, що основними напрямками підвищення точності теоретичного розрахунку сили різання при фрезеруванні є: уточнення розрахунку миттєвого перерізу; уточнення розрахунку сил (нормальної складової та сили тертя) на задній поверхні РІ як тих, що більшою мірою визначають величини складових сил різання (особливо відтискання) при фрезеруванні за умов малої товщини зрізу. Важливим вбачається визначення зони ефективного тертя передньої поверхні РІ та матеріалу, що зрізується. Також бажаним є, щоб модель процесу обробки враховувала те, що при фрезеруванні кінцевими фрезами стан різальної кромки безперервно змінюється, порівняно з точінням, внаслідок інтенсивного викришування матеріалу РІ та закруглення вершини [15].

Для обробки кінцевими фрезами вкрай суттєвим і досі мало дослідженим є виникнення вібрацій у зоні різання [16]. Вільні коливання виникають при обробці багатозубим РІ (в т. ч. кінцевими фрезами) на перехідних фазах контакту лез РІ та поверхонь заготовки (різання та оброблення). Косі удари викликають ступінчасту зміну ординати попередньої траєкторії, що викликає руйнування як РІ, так і деталі. Причому на виході леза затухання відбувається значно менше, ніж при врізанні. Згідно з сучасними уявленнями про вібрації при різанні, коливання при врізанні та виході РІ є вільними затухаючими, при різанні автоколиваннями, що перероджуються в нелінійні параметричні.

Для зменшення негативного впливу вільних коливань на обробку є такі шляхи: зменшення амплітуд коливань за рахунок збільшення жорсткості (принаймні тангенціальної) з одночасним зменшенням мас та сил різання; зменшення ударних імпульсів за рахунок ділення площі зрізу між зубцями фрези та збільшення в часі дії окремих імпульсів. На коливання системи впливає напрямок руху різання (попутний чи зустрічний). Сили різання по осях системи ВПД матимуть різний напрямок залежно від напрямку руху різання, отже різними за амплітудою, проте подібними за характером (в т. ч. і внаслідок биття фрези) будуть виникати коливання.

Аналітичний опис коливань при різанні кінцевими фрезами є складним завданням, ніж при токарній обробці. Успішна боротьба з вібраціями має великий потенціал для підвищення ефективності обробки сферичними кінцевими фрезами.

**Висновки.** Як показав проведений аналіз, певні завдання обробки сферичними кінцевими фрезами залишаються досі не до кінця вирішеними. По-перше, відсутня динамічна модель процесу, яка повною мірою враховувала б всі особливості різання сферичними фрезами: трохіодний рух зуба фрези, стрибкоподібну зміну припусків уздовж криволінійної різальної кромки, механізми утворення шорсткості поверхні тощо. Неповною мірою врахованим залишається пластичне деформування замість стружкоутворення на малих радіусах сферичних фрез. Досі не до кінця розроблені зведені рекомендації для практиків по обробці просторово-складних поверхонь на фрезерних верстатах з ЧПК залежно від геометрії деталі, матеріалу заготовки. Шляхи підвищення якості оброблених поверхонь та продуктивності обробки, в т. ч. запропоновані в роботах [4] та [7], залишаються досі слабо реалізованими в комерційних САМ-системах. Здебільшого підхід до вибору стратегії обробки базується на класичних траєкторіях, що не враховують ні особливості поверхні конкретної деталі, ні змін поверхні заготовки на переходах від чорнового до напівчистового і від напівчистового до чистового.

Зважаючи на це, першим важливим завданням, яке потребує вирішення, є розробка динамічної моделі процесу різання сферичними фрезами, засноване на врахуванні особливостей процесу. Для можливості точного прогнозування стану обробленої поверхні при розробці моделі повинні бути враховані й особливості стружкоутворення при фрезеруванні сферичними фрезами (особливість шару, що зрізується) і особливість утворення шорсткості обробленої поверхні (не розглядати шорсткість виключно як наслідок утворення гребінців після проходів). Для вирішення цих завдань, а також завдань прогнозування особливостей поверхневого шару, стійкості інструменту, необхідно провести глибокий аналіз сил, що виникають при різанні сферичними фрезами, та їхню зміну вздовж як різальної кромки, так і поверхні деталі.

Другим важливим завданням, що тісно пов'язане з попереднім, є скрупульозний аналіз коливань, принаймні системи інструмент–деталь, як того фактора, що має чи не найбільший вплив на якість обробленої поверхні і на період стійкості РІ.

Третім завданням є розробка методу корекції траєкторій обробки сферичними фрезами з урахуванням особливостей, зазначених у висвітленні двох попередніх завдань.

У подальшому вирішення зазначених завдань дає змогу ефективно впливати на реальний процес різання сферичними фрезами, тобто підвищити життєвий цикл як РІ, так і устаткування та оснащення, а також покращити геометрію та стан обробленої поверхні і, врешті, зробити метод більш дешевим та конкурентоспроможним.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Вовк В.В.* Геометричне забезпечення САПР різальної частини сферичних кінцевих фрез : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *В'ячеслав Володимирович Вовк*; Нац. техн. ун-т України "КПІ". – К., 2010. – 187 с.
2. *Равская Н.С.* Геометрия передней поверхности фасонных концевых фрез / *Н.С. Равская, Т.П. Николаенко, В.В. Вовк* // Вестник НТУУ "КПИ". Серия "Машиностроение". – Вып. 45. – 2004. – С. 83–86.
3. *Добротворский С.С.* Геометрические параметры плоскости сдвига при высокоскоростной обработке эвольвентной поверхности концевой фрезой со сферическим концом / *С.С. Добротворский, Е.В. Басова* // Труды Нижегородского гос. тех. ун-та им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. – № 2 (87). – С. 95–100.
4. *Луценко М.О.* Підвищення продуктивності процесу обробки 3-D поверхонь на фрезерних верстатах з ЧПК : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / *Максим Олександрович Луценко*; Нац. техн. ун-т України "КПІ". – К., 2002. – 220 с. – С. 136–145.
5. *Bissacco G.* Size effect on surface generation in micromilling of hardened tool steel / *G.Bissacco, H.N. Hansen and De Chiffre L.* – Annals of the CIRP, 55:593–596, 2006.
6. *Петраков Ю.В.* Нова концепція проектування 3-D моделі протеза колінного суглоба людини / *Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко, О.О. Розенберг* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – № 4 (51). – С. 73–80.
7. *Батуев В.В.* Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском : автореф. дис. ... канд. техн.

- наук : 05.02.08 / Виктор Викторович Батуев ; Юж.-Урал. гос. ун-т. – Ч., 2007. – 21 с.
8. Внуков Ю.Н. Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – С56. – Вип. 5. / редкол. : В.О. Федорович (голова) та ін. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2010. – 350 с. – С. 12–17.
  9. Onozuka: Analysis of Cutting Forces in Ball End Milling , 2000 Proceedings ASPE (2000).
  10. Cutting force modelling in machining with ball end milling / M.Ben Said, A.Ben Amara, W.Bouazid, R.Fredj.
  11. Ko J.H. Mechanistic cutting force model for micro ball-end milling / J.H. Ko, U.Heisel // ICOMM. – 2007. – № 31.
  12. Tsai C.-L. Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis / Chung-Liang Tsai, Yunn-Shiuan Liaob / Journal of Materials Processing Technology. Volume 205, Issues 1–3, 26 August 2008. – Pp. 24–33.
  13. Smaoui M. Simulation of cutting forces for complex surfaces in ball-end milling / M.Smaoui, Z.Bouaziz, A.Zghal // International Journal Of Simulation Modelling (2008) Volume: 7, Issue: 2. – Pp. 93–105.
  14. Внуков Ю.Н. Методика теоретического определения составляющих силы резания при фрезерной обработке / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : НТУ “ХПІ”, 2009. – № 77. – С. 31–46.
  15. Об изменении состояния режущих кромок концевых фрез в процессе резания / В.А. Залогова, Д.В. Криворучко, С.С. Некрасов, Л.В. Голобородько // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2010. — № 4. — С. 172–181.
  16. Мельничук П.П. Элементы анализа колебаний та їх наслідків при обробці деталей різанням / П.П. Мельничук, С.В. Скочко / Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2010 – № 4 (51). – С. 63–73.

ШТЕПІН Олексій Олександрович – аспірант кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– обробка на верстатах з ЧПК.

Подано 25.11.2011

