

УДК 510:621.9

**В.Б. Крижанівський, к.ф.-м.н., доц.
І.В. Крижанівська, к.т.н., доц.***Житомирський державний технологічний університет***ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЗАДИРОК
ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ. ГЕОМЕТРИЧНИЙ АСПЕКТ**

Розглянуто проблему мінімізації задирок при торцевому фрезеруванні. Розроблено та реалізовано проблемно-орієнтований програмний продукт, що дає можливість досліджувати та оптимізувати процес обробки з точки зору впливу геометричних характеристик обробки на появу задирок.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Виклики сучасності, що стосуються якості виробів невинно зростають. Важливими складовими цієї якості є стан крайок обробленої деталі. Створені в системах автоматизованого проектування моделі майбутніх деталей мають абсолютно рівні в геометричному сенсі крайки. Але задирки, що з'явилися на завершальних стадіях обробки, значно спотворюють ідеальну геометрію моделі. В більшості випадків доводиться використовувати вартісну і тривалу процедуру позбавлення від задирок для забезпечення бажаної якості або функціональності деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження [1] демонструють важливість впливу формування задирок на процес обробки взагалі. Задирки не тільки призводять до необхідності економічно вартісної процедури видалення, але й, в більшості, випадків впливають на зношування різального інструменту. Навіть, якщо задирки безпосередньо не впливають на функціональність деталі та їх видалення не передбачається, залишається, в будь-якому разі, дві проблеми. По-перше, задирки, як правило, дуже гострі і можуть травмувати складальників на етапі складання готового виробу. По-друге, задирки, що спочатку досить міцно тримаються, можуть згодом відокремлюватися від деталі і бути причиною порушення функціонування агрегату в цілому. В роботі [2] наведено дані з машинобудівних заводів Німеччини, які свідчать, що витрати, пов'язані з задирками, підвищують вартість готових виробів на 9 %.

Інша значна проблема, що стосується задирок, – це відсутність загальновизнаної міжнародної стандартизації в описі та вимірюванні задирок. Хоча в контрактах на постачання машинобудівної продукції широко використовується термін «free of burrs» (без задирок). В результаті значна кількість компаній для опису задирок використовують власну класифікацію.

Першою фундаментальною роботою по механізмам формування задирок є праця [3]. Автор презентує аналітичну модель утворення задирок та прогнозує їх властивості. Результати порівняння розрахунків з експериментом продемонстрували задовільну узгодженість. Наступна важлива проблема, що привернула увагу дослідників, – це процес видалення задирок. В минулому, в переважній більшості випадків, ця процедура виконувалась вручну. В сучасному виробництві використовується значна кількість нових, більш ефективних та економічно доцільніших способів звільнення від задирок.

В більшості випадків «задирка» визначається як небажаний або непотрібний виступ матеріалу заготовки в результаті пластичної деформації під час механічної обробки. Іноді «задирка» визначається як частина матеріалу заготовки на ребрах або поверхнях деталі, що в результаті обробки лежить поза бажаною геометрією деталі [4]. Найбільш універсальним є визначення, що наведено у [5]. Задирка – це тіло, що утворюється на поверхні деталі під час обробки, яке простягається поза бажаною поверхнею, має незначний об'єм, порівняно з деталлю, поява якої небажана, але, до певної міри, неминуча. Важливою особливістю останнього визначення є констатація неминучості появи задирки, хоча б і незначної. Це природний наслідок механічної обробки.

Залежно від виду механічної обробки задирки формуються по-різному [6, 7]. Наприклад, при торцевому фрезеруванні найбільш впливовим на задирку є кут виходу ножа за межі деталі [7]. Хашімура [8] класифікує задирки при торцевому фрезеруванні відповідно до розміщення, форми та механізму утворення задирок.

Значна увага дослідників приділяється також створенню аналітичних моделей утворення задирок [9, 10], що ґрунтуються на теорії пластичності. З точки зору подібних моделей, слід розрізняти моделі утворення задирок для пластичних і крихких матеріалів.

Одним із важливих методів прогнозування утворення задирок є скінченно-елементний аналіз [11, 12]. Він дає змогу визначити взаємозв'язок цілого ряду впливових факторів. Серед них: властивості деталі (матеріал, геометрія); інструмент (матеріал, зношування, геометрія) та параметри процесу (швидкість різання, подача, глибина різання, умови різання, мастильно-охолоджувальні рідини).

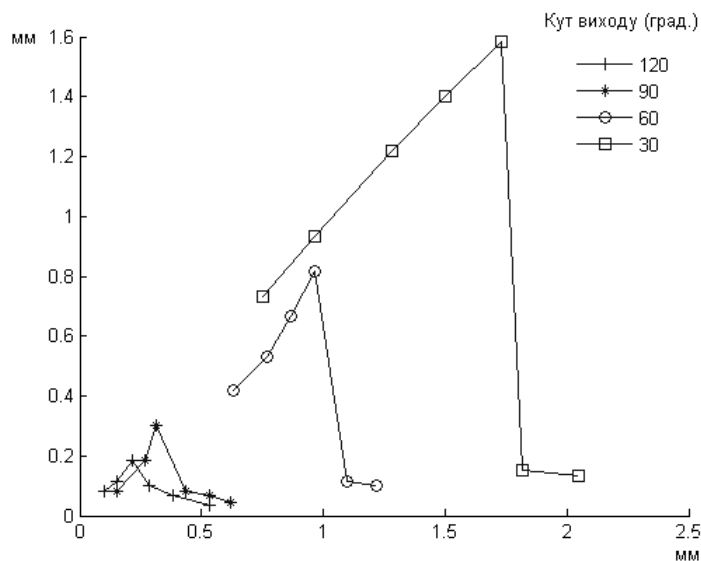


Рис. 1. Залежність первинної та вторинної задирки від кута виходу

Чистове фрезерування одна з важливих фінішних операцій, що проходять деталі на останній стадії обробки. Формування задирок на цій стадії надзвичайно небажане. Експериментальні дослідження [13] показують, що розмір задирок залежить від великої кількості параметрів. Таких, як товщина шару, який зрізається, швидкість різання, подача, кут виходу леза інструменту з заготовки та властивості матеріалу.

Відомо також, що виникають так звані первинні та вторинні задирки, які, в свою чергу, також залежать від умов різання, геометрії ножів, геометрії деталі та властивостей матеріалу.

Графіки з [7] демонструють залежність розмірів задирок від товщини шару, що зрізається та від кута виходу інструменту за межі деталі для фіксованого значення подачі. Первинна задирка відповідає зростаючій ділянці графіка, вторинна – спадній. Із графіків очевидно, що для практики вторинна задирка є досить незначна та нею можна знехтувати. Це підтверджується й іншими дослідниками [14]. Отже на практиці слід уникати саме первинної задирки.

Як правило, на фінішних стадіях обробки товщина шару, що зрізається, фіксована. З точки зору зменшення первинної задирки існує деяке порогове значення кута виходу, яке забезпечує лише незначну вторинну задирку і як результат прийнятну якість деталі. Наприклад, із рисунку 1 при товщині шару 0,5 мм порогове значення кута виходу 90° , а для 1 мм – 60° .

Отже, природним чином, виникає задача мінімізувати сумарну довжину крайок деталі, на яких кут виходу менший деякого порогового значення Ψ_0 .

Викладення основного матеріалу. Математична постановка задачі. Опис траєкторії руху ножа здійснюється по трохойді з параметрами r та R (рис. 2). Параметричне подання трохойди має такий вигляд:

$$x(t) = rt - R \sin t; \quad (1)$$

$$y(t) = r - R \cos t. \quad (2)$$

Модель поверхні. Проекція плоскої поверхні, яка обробляється торцевим фрезеруванням, на паралельну їй площину в загальному випадку має вигляд неопуклої множини точок. Границя цієї множини з будь-якою наперед заданою точністю може бути апроксимована ламаною, що обмежує деякий неопуклий багатокутник P . Цей багатокутник і є моделлю поверхні, що обробляється. Саме ребра багатокутника моделюють місце утворення задирок. Для комп'ютерної обробки багатокутник зручно подати у вигляді послідовності кутових точок p_1, p_2, \dots, p_m в заданому напрямі обходу. Прийmemo обхід у напрямку за годинниковою стрілкою. Однорідні координати точок p_1, p_2, \dots, p_m запишемо у вигляді матриці:

$$\begin{bmatrix} x_1^p & x_2^p & \dots & x_m^p \\ y_1^p & y_2^p & \dots & y_m^p \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Введемо нерухому систему координат x_0y_0 , відносно якої побудуємо трохойду за рівняннями (1)–(2). В той же час поверхня, задана матрицею (3), визначається у власній системі координат x_p0y_p , яка є

рухомою відносно xOy . Таке подання поверхні дає змогу моделювати будь-які відносні положення деталі відносно інструменту, який обробляє.

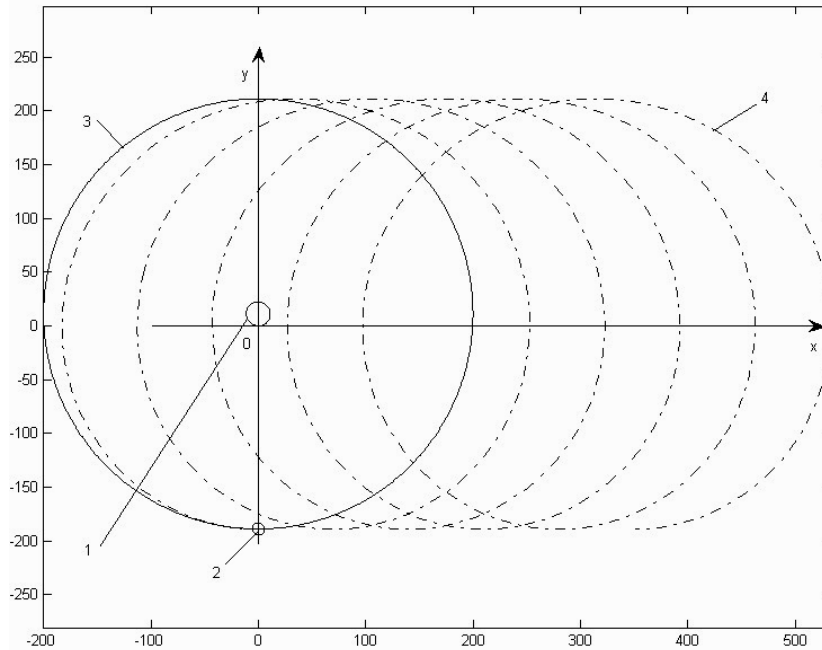


Рис. 2. Траєкторія руху ножа торцевої фрези:
 1 – уявний круг, який котиться без ковзання по осі Ox ; 2 – ніж фрези;
 3 – периметр, на якому розташовані ножі фрези; 4 – траєкторія руху ножа (трохоїда)

Ці положення визначаються як композиція двох перетворень: трансляції та повороту. При переході до однорідних координат, трансляція і поворот в обчислювальному сенсі реалізуються за рахунок матричного множення. Матриці трансляції і повороту в однорідних координатах:

$$translation = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_t & y_t & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

де x_t, y_t – вектор трансляції;

$$rotation = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

де γ – кут повороту.

Першим кроком алгоритму мінімізації задирок є визначення ділянок ребер через які ніж фрези входить в деталь і виходить з неї. Для цього слід обчислити точки перетину трохоїди та сторін багатокутника P .

Побудуємо рівняння прямої, яка проходить через дві послідовні точки p_i, p_{i+1} багатокутника P в напрямку обходу (за годинниковою стрілкою) (6):

$$(x - x_i^p)(y_{i+1}^p - y_i^p) - (y - y_{i+1}^p)(x_{i+1}^p - x_i^p) = 0. \tag{6}$$

Підставляючи в ліву частину рівняння (6) координати точки площини (x, y) , яка не лежить на прямій, що проходить через точки p_i, p_{i+1} , легко визначити внутрішні та зовнішні точки по відношенню до багатокутника P . Цією властивістю зручно скористатися для визначення точок перетину траєкторії різального інструменту (трохоїди) і сторони деталі (ребра багатокутника P).

Значення параметра t , що відповідає точці перетину трохоїди та ребра P , є розв'язком такого нелінійного рівняння:

$$(rt - R \sin t - x_i^p)(y_{i+1}^p - y_i^p) - (r - R \cos t - y_i^p)(x_{i+1}^p - x_i^p) = 0. \tag{7}$$

Рівняння (7) розв'яжемо за допомогою методу Ньютона [15]. За початкову точку t_0 візьмемо точку перетину відрізка (6), який обмежує деталь, та відрізка, що стягує дугу трохоїди. Цей відрізок будується

за двома послідовними точками трохоїди, що отримані за формулами (1)–(2) за рахунок надання приросту параметра Δt :

$$(x - x'_i)(y'_{i+1} - y'_i) - (y - y'_{i+1})(x'_{i+1} - x'_i) = 0, \tag{8}$$

де $x'_i = rt - R \sin t$, $y'_i = r - R \cos t$,

$$x'_{i+1} = r(t + \Delta t) - R \sin(t + \Delta t), \quad y'_{i+1} = r - R \cos(t + \Delta t).$$

Позначимо отриману точку перетину трохоїди та сторони деталі через (x_0, y_0) . В цій точці будемо дотичну до трохоїди за формулою:

$$\frac{x - x_0}{r - R \cos t} = \frac{y - y_0}{R \sin t}. \tag{9}$$

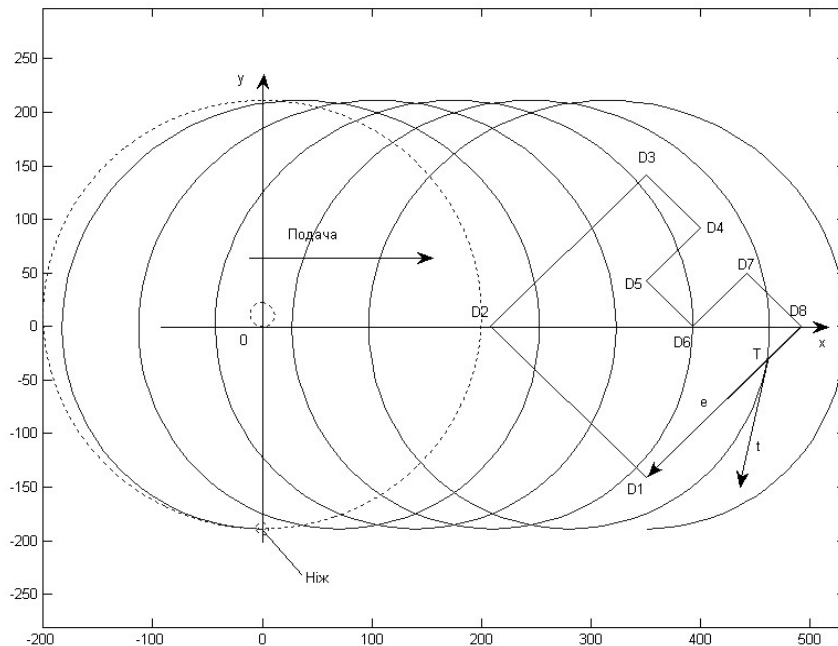


Рис. 3. Схематичне зображення поверхні, яка обробляється, та траєкторії руху ножа

У запропонованій математичній моделі кут виходу ножа визначається як кут між напрямним вектором дотичної t та напрямним вектором сторони деталі e (рис. 3). Враховуючи напрямок обходу периметра деталі, легко визначити точки входу і виходу ножа, а також обчислити значення кутів виходу в кожній точці перетину периметра деталі та трохоїди.

Вторинна задирка утворюється, якщо кут перевищує деяке порогове значення. Позначимо його Ψ_0 . Оскільки кути виходу залежать від положення деталі в глобальній системі координат, то маємо функцію мети, що залежить від параметрів розміщення локальної системи координат деталі в глобальній системі координат інструменту. Фактично маємо функцію, що залежить від трьох параметрів: дві координати вектора, трансляції та кут повороту.

Задача оптимізації полягає в тому, щоб за рахунок цих геометричних параметрів мінімізувати сумарну довжину ребер деталі, на яких кут виходу інструменту не перевищує порогове значення Ψ_0 .

Параметри, які оптимізуються, повинні також забезпечувати положення деталі в зоні обробки. Тому дана задача оптимізації відноситься до задач умовної оптимізації.

Нехай $G \subset X \times Y \times A$ – множина припустимих значень параметрів розміщення багатокутника P у глобальній системі координат.

Подати функцію f у вигляді аналітичного виразу, зручного для застосування оптимізаційних методів першого порядку, не є можливим. У даній роботі пропонується використати методи оптимізації нульового порядку.

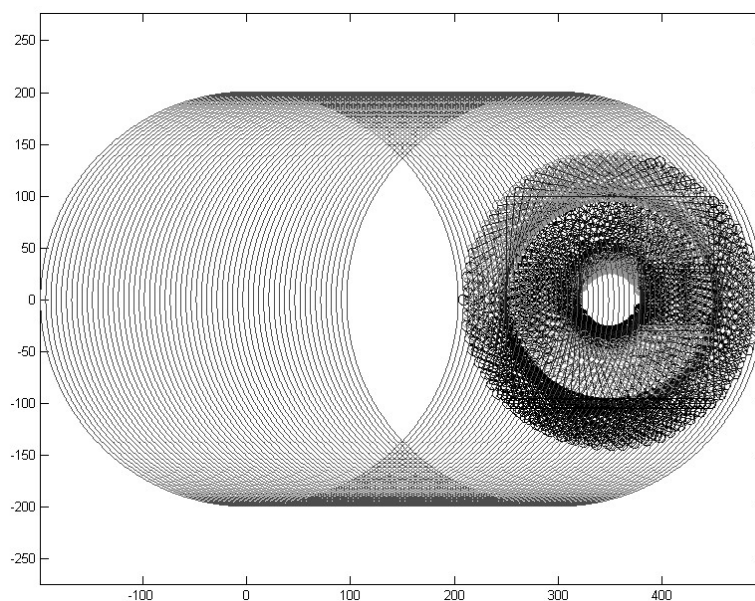


Рис. 4. Послідовні зображення положення деталі з визначенням на кожному кроці кутів виходу трохоїди

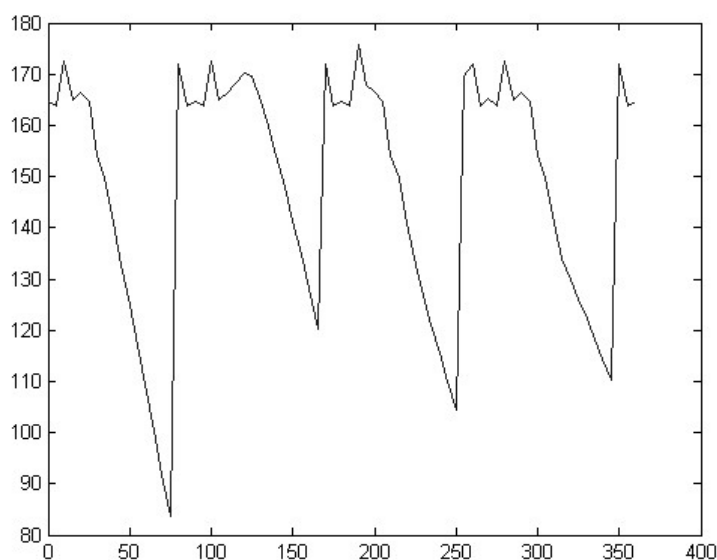


Рис. 5. Залежність максимального кута виходу трохоїди від кута повороту деталі

Про характер поведінки функції f дає уявлення такий обчислювальний експеримент. Нехай x_t та y_t – фіксовані, а γ – набуває всіх можливих значень від 0 до 2π . Максимальний кут виходу ножа фрези з деталі залежно від γ змінюється як показано на рисунку 4.

Очевидно, що функція f взагалі не є унімодальною і для знаходження глобального оптимуму необхідно надзвичайно велика кількість обчислень. Тому в розробленому програмному забезпеченні застосовані алгоритми, що збігаються до локального мінімуму.

Одним з найкращих сучасних прямих методів мінімізації функцій кількох змінних, що не потребує обчислення часткових похідних цільової функції є метод Нелдера-Міда [16]. Він зводиться до побудови симплекса в n – вимірному просторі, який заданий $n + 1$ вершиною. В двовимірному просторі симплекс буде трикутником, у тривимірному – пірамідою. На кожному кроці обирається нова точка всередині або поблизу симплекса. Вона порівнюється з однією з вершин симплекса. Найближча до цієї точки вершина симплекса замінюється цією точкою. Таким чином, симплекс перебудовується і дозволяє знайти нове, краще значення функції мети. Процес продовжується, поки розміри симплекса не стануть меншими заданої похибки розв'язку.

Висновок. Розроблений алгоритм для мінімізації утворення задирок при торцевому фрезеруванні поверхонь, що мають у плані форму довільного багатокутника. Запропоновано алгоритм обчислення зон первинної та вторинної задирки. За допомогою даного алгоритму реалізується обчислення функції цілі поставленої задачі оптимізації. Для розв'язання цієї задачі використаний метод Нелдера-Міда. Створена комп'ютерна модель торцевого фрезерування дозволяє досліджувати геометрію процесу з точки зору впливу на нього розміщення ножів, орієнтації деталі, кількості ножів тощо. Також можливе розширення функціональності програмного забезпечення для дослідження процесів обробки за допомогою нових, перспективних інструментів, що побудовані на базі торцевої фрези.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Burrs—Analysis, control and removal / J.C. Aurich, D.Dornfeld, P.J. Arrazola at all. // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2009. – № 58. – Pp. 519–542.
2. Aurich J.C. Untersuchung zur Beherrschung der Sauberkeit von zerspanend hergestellten Bauteilen / J.C. Aurich, F.Span, K.Sauber // Ergebnisworkshop, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Technische Universität Kaiserslautern. – 2006.
3. Gillespie L.K. The Formation and Properties of Machining Burrs / L.K. Gillespie, P.T. Blotter // Transactions of ASME Journal of Engineers for Industry. – 1976. – № 98. – Pp. 66–74.
4. Schafer F. Entgraten, Krausskopfverlag, Mainz / F.Schafer. – 1975.
5. Beier H.M. Handbuch Entgrattechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratbeseitigung für Konstruktion und Fertigung. Hanser Verlag. / H.M. Beier. – 1999.
6. Gillespie L.K. Deburring and Edge Finishing Handbook. Society of Manufacturing Engineers / L.K. Gillespie. – 1999.
7. Chern G.L. Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting / G.L. Chern // Ph.D.Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA. – 1993.
8. Hashimura M. Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation / M.Hashimura, J.Hassamont, D.A. Dornfeld // Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1999. – № 121 (1). – Pp. 13–19.
9. Pekelharing A.J. The Exit Failure in Interrupted Cutting / A.J. Pekelharing // CIRP Annals. – 1978. – № 27 (1). – Pp. 5–10.
10. Toropov A. An Effective Visualization and Analysis Method for Edge Measurement. Computational Science and Its Applications / A.Toropov // ICCSA. – 2007. – № 4706. – Pp. 941–950.
11. Hashimura M. Analysis of Burr Formation Mechanism in Orthogonal Cutting / M.Hashimura, Y.P. Chang, D.Dornfeld // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1999. – № 121 (1). – Pp. 1–7.
12. Modeling and Simulation of Burr Formation / J.Leopold, G.Schmidt, K.Hoyer, A.Freitag // State-of-the-Art and Future Trends. Proceedings of the 8th International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2005. – Pp. 73–83.
13. Nakayama K. Burr formation in Metal Cutting / K.Nakayama, M.Arai // Annals of the CIRP. – Vol. 36 (1). – 1981. – Pp. 33–36.
14. Study on Mechanism and Similarity of Burr Formation in Face Milling and Drilling / K.Kitajima, T.Miyake, A.Yamamoto, Y.Tanaka // Technology Reports of Kansai University. – № 32. – 1990.
15. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М. : Наука, 1987. – 600 с.
16. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Б.Банди. – М. : Радио и связь, 1988.

КРИЖАНІВСЬКИЙ Вячеслав Борисович — кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри програмного забезпечення обчислювальної техніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютерне моделювання;
- технологія машинобудування.

КРИЖАНІВСЬКА Ілона Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання та обчислювальні методи в наукових дослідженнях;
- технологічна підготовка гнучких виробничих систем.

Подано 17.06.2011

