

УДК 621.9.06-529-8

**О.В. Литвин, І.Р. Ящук, С.С. Раус**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

**ПРИВЕДЕННЯ ЖОРСТКОСТІ СИСТЕМИ ПАТРОН –ДЕТАЛЬ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА**

Технологічна система верстата представляє собою систему, жорсткість елементів якої в процесі обробки обумовлюють виникнення систематичних та випадкових похибок розмірів і геометричної форми оброблюваних заготовок. Разом з тим, ця технологічна система є замкненою динамічною системою, здатною до збудження та підтримання вібрацій, що породжують похибки форми оброблюваних поверхонь (некруглість, хвилястість) і збільшують їх шорсткість. Жорсткість затискних патронів має великий вплив на точність обробки, на динамічну картину затискних зусиль, згинальних і перекидних моментів та характеризують їх пружні деформації і поведінку під впливом зовнішніх сил і моментів, стійкість до змін їх форми і положення. Розробка методів і процесів, що дозволяють описати і визначити жорсткість затискних патронів, має велике практичне значення. Метою роботи є розробка методики визначення приведеної жорсткості елементів технологічної системи шпиндель –патрон - деталь. Розробка методики досліджень та аналіз результатів складають наукову основу даної роботи. В результаті проведення досліджень визначенні особливості характеристик приведеної жорсткості системи плунжерний патрон - деталь токарного верстату, розроблені рекомендації по зменшенню впливу нелінійних параметрів жорсткості верстата на точність обробки, що використовуються при проектуванні затискних патронів.

*Ключові слова:* затискний патрон, жорсткість, точність, конструкції, деталь, дослідження, верстат.

**А.В. Литвин, І.Р. Ящук, С.С. Раус**

Національний технічний університет України

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

**ПРИВЕДЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМЫ ПАТРОН -ДЕТАЛЬ ТОКАРНОГО СТАНКА**

Технологическая система станка представляет собой систему, жесткость элементов которой в процессе обработки обуславливающих возникновение систематических и случайных погрешностей размеров и геометрической формы обрабатываемых заготовок. Вместе с тем, эта технологическая система является замкнутой динамической системой, способной к возбуждению и поддержанию вибраций, порождающих ошибки формы обрабатываемых поверхностей (некруглость, волнистость) и увеличивают их шероховатость. Жесткость зажимных патронов имеет большое влияние на точность обработки, на динамическую картину зажимных усилий, изгибающих и перекидных моментов и характеризует их упругие деформации и поведение под воздействием внешних сил и моментов, устойчивостью к изменениям их формы и положения. Разработка методов и процессов, позволяющих описать и определить жесткость зажимных патронов, имеет большое практическое значение. Целью работы является разработка методики определения приведенной жесткости элементов технологической системы шпиндель -патрон - деталь. Разработка методики исследований и анализ результатов исследований составляют научную основу данной работы. В результате проведения исследований определены особенности характеристик приведенной жесткости системы патрон - деталь токарного станка. разработаны рекомендации по уменьшению влияния нелинейных параметров жесткости станка на точность обработки, используемых при проектировании станков.

*Ключевые слова:* патрон, жесткость, точность, конструкции, детали, исследования, станок.

**O. Litvin, I. Yashchuk, S. Raus**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**CONSTRUCTION OF THE HARDNESS OF THE PATRON SYSTEM-THE DETAIL OF THE TURNING MACHINE**

The technological system of the machine is a system, the stiffness of which elements in the process of processing cause the occurrence of systematic and random errors in the size and geometric shape of the workpieces. At the same time, this technological system is a closed dynamic system capable of excitation and maintenance of vibrations that generate errors in the shape of treated surfaces (non-circularity, wavelength) and increase their roughness. The hardness of clamping cartridges has a great influence on the accuracy of machining, on the dynamic picture of clamping forces, bending and overlapping moments and characterizing their elastic deformation and behavior under the influence of external forces and moments, resistance to changes in their shape and position. The development of methods and processes that allow to describe and determine the tightening of clamping cartridges is of great practical importance. The purpose of the work is to develop a method for determining the reduced rigidity of the elements of the technological system spindle -potron - part. The development of research methods and the analysis of research results constitute the scientific basis of this work. As a result of the research the characteristics of the reduced rigidity of the chuck system are determined - the lathe part. The recommendations for reducing the influence of nonlinear parameters of the machine's rigidity on the accuracy of machining, used in the design of machines.

*Key words:* clamping chuck, stiffness, precision, design, detail, research, machine tool.

**Постановка проблеми.** Затискні патрони широко застосовуються для закріплення заготовок при обробці на токарних верстатах. Вимоги до підвищенню точності обробки деталей безперервно підвищуються, і ця тенденція досить важлива для розвитку сучасного виробництва. Підвищення точності обробки на токарному верстаті потребує визначення нелінійних характеристик жорсткості основних елементів пружної системи верстату, в тому числі системи патрон-деталь. На точність обробки, в основному, впливають показники жорсткості та точності шпинделя та затискного патрона верстата. Параметри жорсткості визначаються, як правило, експериментальним методом при навантаженні шпинделя і затискного патрона. Жорсткість системи патрон – деталь має великий вплив на точність обробки, на динамічну картину затискних зусиль, згинальних і перекидних моментів. Жорсткість затискного патрона, його складальних одиниць або складових частин характеризують їх пружні деформації і поведінку під впливом зовнішніх сил і моментів, стійкість до змін їх форми і положення. Кожний затискний патрон також являє собою складну динамічну систему із пружно-дисипативними зв'язками. Розробка методів і процесів, що дозволяють описати і визначити жорсткість затискних патронів, має велике практичне значення. Актуальним питанням є визначення приведеної жорсткості системи патрон-деталь до осі або діаметру затиску, визначення матриці радіальної жорсткості системи патрон-деталь, яка безпосередньо визначає пружні деформації в зоні обробки і впливає на точність обробки на верстаті.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Дослідження різних типів затискних патронів показали, що сумарна деформація системи патрон -деталь при дії на неї сили різання в більшій мірі залежить від деформації поверхні в стиках кінематичних пар, ніж від власних деформацій деталей патрона [1, 2]. В [3] досліджувалося напружений стан патрону через зміну умов тертя, сил і нелінійних характеристик стиків і спряжень в умовах складної деформації. Вченими [4] вводиться поняття диференціальної жорсткості заготовки. При розрахунку необхідного мінімального зусилля затиску все навантаження при затиску заготовки враховуються одночасно. Точність нової моделі розрахунку затискних сил явно перевищує точність попередніх підходів до розрахунку. В роботі [5] досліджується параметрична нестійкість в процесі роботи затискного патрона. Дається аналітичний критерій стійкості і виконане експериментальне підтвердження. Параметричне коливання генерується спрямованою орієнтацією жорсткості системи патрон -деталь. В роботі [6] описується методика, яка компенсує похибки обробки, що виникають в результаті затиску кулачками з урахуванням їх жорсткості і зміни радіальної жорсткості системи затискного патрона. В дослідженні [7] було проаналізовано процес різання в різних умовах затиску і розроблено узагальнену математичну модель для прогнозування форми обробленої деталі в залежності від типу і жорсткості затискного патрона. Експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними викладками. В роботі [8] виконані випробування на радіальну і згинальну жорсткість системи патрон - деталь для різних співвідношень діаметрів кулачка і деталі, положень сили різання щодо кулачків і кутів їх розточування. В статті [9] всі основні фактори, що впливають на точність обробки деталі в патроні були визначені шляхом складання бюджету помилок і систематичних вимірювань. З результатів була розроблена карта помилок, яка підсумовує зв'язок між цими факторами і їх вплив на похибку обробки деталі. В [10] розроблений патрон, яка вимірює під час різання зусилля затиску на заготовці. Розроблено спеціальній кулачок із застосуванням методу скінченних елементів. Це дозволило знайти кореляцію між відхиленнями заготовки і зусиллям і жорсткістю затиску. В роботі [11] досліджується критична сила згину та радіальна жорсткість затиску патрона і способи її поліпшити. В літературних джерелах не виявлено надійних методик приведення параметрів жорсткості технологічної системи патрон - деталь.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Поряд з ними існує та поки що не отримав досить широкого поширення інший тип визначення жорсткості системи патрон -деталь, який можна здійснювати теоретичними розрахунками, зокрема шляхом визначення приведеної жорсткості системи до конкретної точки чи елемента. Розробка методики та аналіз результатів досліджень складають наукову основу даної роботи. Метою роботи є розробка методик визначення приведеної жорсткості технологічної системи патрон-деталь.

**Викладення основного матеріалу.** На кафедрі "Конструювання верстатів та машин" НТУУ "КПІ" розроблена спеціальна методика визначення приведеної жорсткості системи патрон -деталь токарних верстатів, які дозволяють визначити параметри їх жорсткості: радіальну та поворотну. Дана методика використана під час виконання досліджень приведених характеристик

жорсткості технологічної системи плунжерний патрон – деталь токарного верстату ТАК-102, що серійно випускається Київським ВАТ «Веркон» (рис.1).

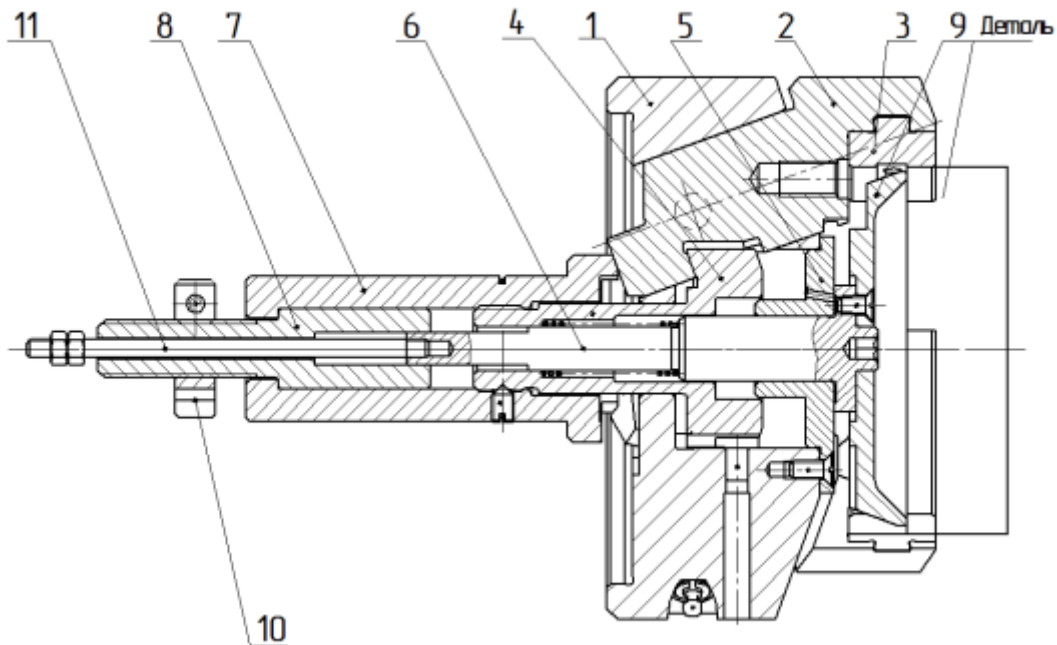


Рис. 1. Конструктивна схема плунжерного затискного патрона

Матрицю просторової жорсткості системи патрон-деталь можна визначити, розглядаючи ланки передавально – підсилюючого механізму, які працюють на стискання та розтискування, або як поступальні елементи. Матриця загальної жорсткості системи плунжерний патрон – деталь встановлює взаємозв'язок між пружним переміщенням в системі координат патрона під дією статичного навантаження та власне навантаженням. Розмірність такої матриці просторової жорсткості  $9 \times 9$  [4]. Матриця просторової жорсткості дорівнює сумі матриць жорсткості окремих ланок. Серед цих жорсткостей радіальна та кутова при радіальному навантаженні мають найбільший вплив на динамічну зміну зусилля затиску. У точці прикладання зусилля затиску воно викликає переміщення затискного кулачка, що складається з окремих переміщень всіх елементів, що беруть участь в передачі енергії від приводу, таких як затискний кулачок (змінний), основний кулачок (підкулачник), передавально - підсилюючий механізм і корпус патрона, а також переміщення в самих елементах. В дослідженні розглядається лінійна залежність, яка справедлива лише для малих величин пружних переміщень та у випадку статичного навантаження. На основі отриманих даних будують математичні моделі, які є підставою для аналізу і визначення необхідних заходів для розробки рекомендацій щодо підвищення жорсткості затискного патрона і точності обробки. Цей підхід доволі складний та трудомісткий.

Для інженерних розрахунків можна використовувати поняття приведеної жорсткості системи патрон-деталь до осі або діаметру затиску. Методику розрахунку проілюструємо на прикладі плунжерного затискного патрона. Трьохплунжерний патрон складається з корпусу 1, в похилих під кутом  $20^\circ$  отворах якого розміщені три плунжери 2, передні кінці яких споряджені затискними елементами 3. Затискні елементи фіксуються в плунжерах 2 гвинтами. Діаметр затискних елементів 98 мм, діаметр корпусу патрона 150 мм. Плунжери 2 з'єднані між собою та з втулкою 8 привода 11 поршнем 4 та фіксуються в осьовому напрямі втулкою 5. В поршні 4 розміщена тяга 6, яка з'єднана з гвинтом 11. З торця затискний патрон закритий кришкою – упором 9, на який базується деталь в осьовому напрямі. Хід поршня 4 та привода 11 обмежується гайкою 10. При складанні затискного патрона всі рухливі з'єднання змащені пастою НП-232 ГОСТ 14068-79. В процесі експлуатації періодично змащуються плунжери 2 вищевказаної пастою.

При консольному затиску деталі на неї діють сили процесу різання, що викликають в затискному патроні осьові та радіальні відтискання. У процесі затискання заготовки після вибирання кутового зазору між корпусом та плунжером з жорсткістю  $C_K$  додається контактна

жорсткість стику  $C_{1-2}$ . Сумарна радіальна приведена жорсткість згідно з врахуванням паралельного та послідовного з'єднання жорсткостей в передавально - підсилюючому механізмі, буде:

$$C_p = \frac{1}{E_1}; \text{ де } E_1 = \frac{1}{C'_{23} + C_{23}} + \frac{1}{C_K + (C'_{12} + C_{12})\cos\alpha}.$$

де:  $C_{23}$  та  $C'_{23}$  – контактна жорсткість системи плунжер - заготовка;  $C_{12}$  та  $C'_{12}$  – контактна жорсткість стику корпус - плунжер (рис.2).

Для визначення контактної жорсткості стиків  $C'_{23}$  та  $C_{23}$ ;  $C_{12}$  та  $C'_{12}$  необхідно визначити реакції у точках контакту 1 та 2 штоку та корпусу. З врахуванням контактних деформацій у стиках плунжер - заготовка відтискання на вильоті  $\ell_p$  буде:

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4;$$

де  $y_1$  – деформація деталі під дією сили різання;  $y_2$  – контактні деформації у стиках плунжер - деталь;  $y_3$  – контактні деформації у стиках корпус патрона - плунжер;  $y_4$  – переміщення за рахунок повороту плунжера в корпусі на кут  $\theta_{12}$ :

$$y_1 = \frac{P_p(\ell_p + b)}{EI}; \quad y_2 = \theta_{23}(b + \ell_p); \quad y_3 = \theta_{12}(a + b + \ell_p + \ell);$$

$$\theta_{23} = \frac{2(R'_{23} + R_{23})}{C_{23} \cdot b}; \quad \theta_{12} = \frac{2(R'_{12} + R_{12})}{C_{12} \cdot a};$$

де  $\theta_{23}$  та  $\theta_{12}$  – кути повороту у стиках плунжер - деталь та корпус – плунжер відповідно (рис.3). З урахуванням повороту кулачка на кут  $\Delta\gamma$  до контакту з корпусом відтискання на вильоті  $\ell_p$  буде:

$$y_4 = \Delta\gamma(a + b + \ell + \ell_p);$$

де

$$\Delta\gamma = \frac{R_{12} \cdot \cos\alpha}{C_{12} \cdot h}(a + b + \ell + \ell_p) - \frac{R'_{12} \cdot \cos\alpha}{C'_{12}}.$$

Відстань точки повороту кулачка від торця патрона:

$$h = \frac{R_{12} \cdot a}{R'_{12} + R_{12}}.$$

Радіальна приведена жорсткість системи патрон-деталь з урахуванням переносу на лінію дії радіальної сили затиску  $T_\Sigma$ :

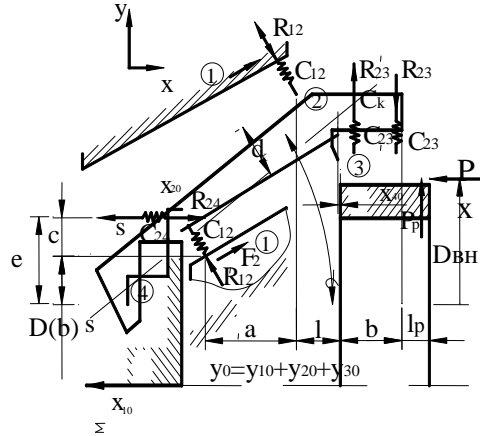
$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_{12} + C'_{12}} + \frac{1}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C'_{12}}} + \frac{1}{C_K} + \frac{1}{C_{23} + C'_{23}};$$

$$C_{12} + \frac{C_{12} \cdot C'_{12}}{a}$$

Оскільки кут  $\Delta\gamma$  мізерно малий (спряження корпус-плунжер виконано по  $H6/k6$ ), то складовою  $y_3$  можна знехтувати. Радіальна жорсткість  $C_p$  системи патрон-деталь при затисканні нежорсткої кільцевої деталі менша її поворотної жорсткості  $C_\Pi$ , що визначається співвідношенням моменту зовнішніх сил (сил різання  $M_p$ ) до кута  $\theta$  повороту деталі навколо точки О. Радіальні відтискання в системі патрон-деталь від повороту деталі значно менші величини радіальних переміщень, викликаних силою затискання та різання.

Скориставшись методикою аналізу пружних відтискань в системі патрон – деталь [2], визначимо сумарний кут  $\theta$  повороту деталі, затиснутої у плунжерному патроні від сили різання  $P_p$  при наступних припущеннях: 1) пружно-фрикційний шарнір утворений трьома шарнірами, причому центри їх не співпадають, як це відбувається у цанговому патроні одинарного затискання; 2) затискний кулачок (елемент) контактує з заготовкою по всій довжині та

розглядається як балка на пружній основі, маючи граничний кут повороту, рівний кутовому зазору між заготовкою та кулачком; 3) кутове переміщення у стику корпус- плунжер в штокових патронах відсутній, через те, що радіуси кривизни спряжених поверхонь рівні та кутовий зазор між ними дорівнює нулю, тому вони контактують по всій поверхні та навантаження від складових сил різання розподіляється по усій поверхні контакту; 4) затискний кулачок розглядається як балка на двох опорах; 5) радіальна, поворотна та осьові жорсткості усіх затискних елементів однакова.



$$X = X_{10} + X_{20} + X_{30} + X_{40}$$

Рис.2. Розрахункова схема плунжерного патрона для визначення приведеної жорсткості

У відповідності з розрахунковою схемою (рис.3) та прийнятими припущеннями визначимо відповідні складові сумарного кута повороту та поворотну жорсткість системи патрон - деталь. Кут повороту заготовки  $\theta_{23}$  відносно затискних елементів через різницю контактних деформацій у стику заготовка-затискний елемент:

$$\theta_{23} = \frac{2(R_{23} + R'_{23})}{C_{23} \cdot b};$$

де

$$R'_{23} = \frac{1}{b} \left( R_X \frac{D_{BH}}{2} + P_P \ell_P \right); \quad R_{23} = \frac{1}{2} \left[ P_X \frac{D_{BH}}{2} + P_P (\ell_P + \ell) \right];$$

$R'_{23}$  і  $R_{23}$  - реакції у точках контакту заготовки та затискного елемента;

$$P_P = \sqrt{P_y^2 + R_Z^2};$$

де  $P_P$  – радіальна та  $P_X$  – осьова складова сили різання. Кут повороту  $\theta_{12}$  у стику корпус – плунжер дорівнює:

$$\theta_{12} = \frac{2(R_{12} + R'_{12})}{C_{12} \cdot a};$$

де

$$R_{12} = \frac{P_P (a + b + \ell + \ell_P) + P_X (D_{BH} - d)}{a}; \quad R'_{12} = \frac{P_P (b + \ell + \ell_P) + P_X (D_{BH} - d)}{a};$$

Реакції  $R_1$  та  $R_2$  - реакції у точках взаємодії корпусу і кулачка.

Таким чином, отримавши сумарний кут повороту  $\theta = \theta_{23} + \theta_{12}$  системи патрон - деталь для плунжерного патрона. Визначимо її поворотну жорсткість:

$$C_{II} = \frac{M_P}{\theta} = \frac{M_P}{\theta_{23} + \theta_{12}};$$

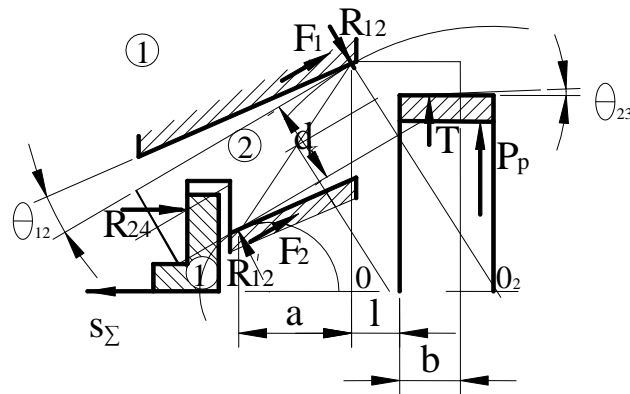


Рис.3. Розрахункова схема плунжерного патрона для визначення силових факторів

Радіальна жорсткість  $C_p$  системи патрона при затисканні нежорсткої деталі менша її поворотної жорсткості  $C_{\theta}$ , що визначається співвідношенням моменту зовнішніх сил (сил різання  $M_p$ ) до кута  $\theta$  повороту деталі навколо точки О. Радіальні відтискання від повороту деталі значно менші величини радіальних переміщень, викликаних силою затискання та різання.

**Висновки.** В результаті проведення досліджень визначенні приведені поворотні та радіальні жорсткості системи плунжерний патрон - деталь токарного верстату. На результатах досліджень розроблені рекомендації по зменшенню впливу нелінійних параметрів жорсткості верстата на точність обробки, що використовуються при проектуванні верстатів ВАТ "Веркон". Представлені спосіб і методика контролю жорсткості системи патрон - деталь металорізальних верстатів показали свою працездатність, ефективність, а також достатню простоту реалізації, що найбільш сприятливо для використання у виробничих умовах.

#### Інформаційні джерела:

1. Орликов М.Л. Динамика станков.- К.:Вища школа.- 1989. – 272 с.
2. Кузнецов Ю.Н. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: монография (в 2-х частях) / Ю.Н. Кузнецов, В.Н. Волошин, П.М. Неделчева, Ф.В. Эль-Дахаби — К.: ООО «ГНОЗИС». — Ч.1, 2009. — 270 с.; Ч. 2, 2010. — 466 с.
3. Литвин О.В. Вплив характеристик затискного патрону токарного верстата на обробку нежорстких деталей / Захист металургійних машин від поломок. Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. – Маріуполь, випуск 11, 2009, с. 42 -47.
4. E. Usui. (1994). Advancement of Intelligent Production: Seventh International Conference on Production/Precision Engineering, 4th International Conference on High Technology, Chiba, Japan, 15-17 September 1994.
5. Feng P.F. (2003). Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkraeften bei Backenfuttern. Technische Universität Berlin, Berlin.
6. Doi M, Masuko M, Ito Y, Tezuka A (1985) A study on parametric vibration in chuck work. Bull JSME Jpn Soc Mech Eng 28(245):2774–2780
7. Lee J., Lee S. (2004) Chucking compliance compensation with a linear motor-driven tool system [J]. Int J Adv Manuf Technol 23(1–2):102–109
8. Rahman M (1989) A study on the deviation of shape of a turned workpiece clamped by multiple jaws. CIRP Ann Manuf Technol 38(1):385–388
9. Ema S., Marui E. (1994) Chucking performance of wedge-type power chucks. J Eng Ind Trans ASME 116(1):70–77.
10. Byun J, Liu C.R. (2012) Methods for improving chucking accuracy. J Manuf Sci Eng Trans ASME 134(5) (10 pages):051004.
11. Eggebrecht M., Georgiadis A., Wagner T. Strategies for correcting the workpiece deformation during the manufacturing at the milling process. Conferences 2013 - Sensor 2013.
12. Wang J. Zhang J., Feng P., Wu Z., Zhang G.. (2015). Modeling and simulation for the critical bending force of power chucks to guarantee high machining precision. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. July 2015, Volume 79, [Issue 5–8](#), pp 1081–1094.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2018