

І.В. Луців, д.т.н., проф.
В.Н. Волошин, к.т.н., доц.
Р.О. Бица, інж.
О.О. Стахурський, аспір.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Оцінка впливу параметрів обробки на похибку форми при точінні деталей, затиснутих у токарному патроні з адаптивними кулачками

Розглядається проблема встановлення залежності відхилення геометричної форми деталі в поперечному перерізі від діаметра затиску, швидкості різання, подачі і глибини різання при напівчистої обробці. Проведено аналіз однофакторних залежностей відхилення від круглості від значень режимів обробки. За допомогою спеціального пакета прикладних програм проаналізовані результати експерименту, який проводився в лабораторних умовах. Представлений дисперсійний аналіз з включенням опції для оцінки головних лінійних і квадратичних ефектів, а також отримана модель апроксимації результатів експерименту. Вона являє собою емпіричну залежність для оцінки впливу режимів обробки і діаметру затиску на формування похибки форми (динамічної похибки). Встановлено, що для отримання необхідної точності форми при обробці на верстаті, оснащеному токарним патроном з адаптивними затискними елементами, доцільно керувати найбільш статистично значимими факторами, якими є глибина різання і подача.

Ключові слова: *точіння; похибка форми; токарний патрон; адаптивний затискний елемент; параметри обробки; план експерименту; поверхня відгуку*

Постановка проблеми. Задача підвищення технічного рівня сучасних токарних верстатів і автоматичних верстатних систем в умовах багатомоделювального виробництва, високошвидкісної і прецизійної обробки деталей вимагає покращення характеристик їх основних механізмів та вузлів, одними із яких є механізми затиску. Встановлення деталі та її утримання в процесі обробки супроводжується комплексом фізичних явищ, серед яких пружні відтискання в приводі затискного механізму (ЗМ) і системі патрон-деталь; пружні та пластичні деформації деталей та стиків і порушення фізичних зв'язків між ними; теплові та інші явища [4, 10]. Здатність затискного механізму верстата виконувати робочі функції при змінах умов роботи істотно залежить від можливості їх пристосування до змінних факторів впливу. На сучасному етапі розвитку верстатів токарної групи велика увага приділяється підвищенню гнучкості їх механізмів затиску (здатності адаптуватися до геометрії заготовок, що підлягають обробці), а також можливості швидкого переналагодження на обробку деталей іншого типорозміру [3, 4]. Розробка та дослідження нових конструкцій адаптивних затискних елементів токарних патронів є досить важливою науково-технічною задачею, вирішення якої дозволило забезпечити адаптацію затискних пристроїв до геометрії базових поверхонь заготовок, що підлягають обробці, та виконання сучасних вимог до швидкості переналагодження, якості та точності поверхонь оброблюваної деталі.

Похибки обробки деталей на токарних верстах, викликані в основному відносними коливаннями оброблюваної деталі та інструменту. Рівень цих коливань в значній мірі пов'язаний з фізичними процесами, обумовлений режимами обробки та іншими експлуатаційно-технологічними факторами. Динамічну точність обробки можна охарактеризувати відхиленнями геометричної форми деталі в поперечному перетині, що викликається відносними зміщеннями інструменту і заготовки при різанні [4, 7]. Тому встановлення залежності величини цього відхилення від параметрів обробки дозволило б прогнозувати це відхилення та в повній мірі використати технологічні можливості верстату, оснащеного токарними патронами з адаптивними затискними елементами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Експериментальним дослідженням затискних пристроїв токарних верстатів із адаптацією до геометрії затиску присвячено ряд робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. У роботах [2–4, 10] приведені результати експериментальних досліджень силових характеристик, точності і жорсткості затиску затискними патронами плунжерного типу із позиційними багатопрофільними затискними елементами та динамічної похибки обробки. Наведені результати експериментальних досліджень свідчать про те, що похибка форми при точінні заготовок швидко переналагоджуваними затискними патронами плунжерного типу із позиційними багатопрофільними затискними елементами суттєво залежить від таких параметрів обробки, як глибина різання, подача, положення багатопрофільного затискного елемента. У роботі [5] наведені результати експериментальних досліджень силових і динамічних характеристик та точності і жорсткості затиску затискними патронами

цангового та безцангового типів для затиску пруткових заготовок. Дослідженням затискних патронів для затиску штучних заготовок в широкому діапазоні присвячена робота [12], у якій проведено теоретичну та експериментальну оцінку ряду конструкцій гнучких затискних елементів з поперечним перерізом кругоподібної форми, які самостійно пристосовуються до поверхні деталі в діаметральному перерізі.

Дані результати показали, що по цих характеристиках досліджені затискні патрони не поступаються традиційним, якими оснащуються токарні верстати, що працюють в умовах багатонаменклатурного виробництва.

У роботах [6, 13] приведені запропоновані принципові підходи до створення нових конструкцій затискних кулачків адаптивного типу шляхом навмисного введення в їх конструкцію зон деформації, що дозволяє забезпечити повний контакт поверхні затиску кулачка до базової поверхні оброблюваної заготовки. Також наведені ряд розроблених конструкцій адаптивних затискних кулачків, на один з яких отриманий патент України на корисну модель [8]. Розроблений затискний кулачок має зону адаптації у вигляді кільцевого сегменту, який під час дії сили затиску деформується і цим самим забезпечує повний контакт із поверхнею затиску оброблюваної заготовки.

У роботі [14] наведені методика та результати експериментальних досліджень переміщень найбільш деформованої частини кільцевого сегменту зони затиску запропонованого адаптивного затискного кулачка в діапазоні його діаметрів затиску та в робочому діапазоні зусиль затиску. За результатами експерименту отримано залежності переміщень від навантаження найбільш деформованої частини кільцевого сегменту зони затиску адаптивного затискного кулачка для різних діаметрів затиску. Результати експериментальних досліджень показали, що затискна частина кулачка повністю адаптується до заготовок різних діаметрів, і це дозволяє не пошкоджувати поверхні затиску при чистовій токарній обробці заготовок.

Мета дослідження. Встановлення залежності величини відхилення геометричної форми деталі в поперечному перетині, що викликається відносними зміщеннями інструменту і заготовки при різанні, від параметрів обробки для його прогнозування та використання в повній мірі технологічних можливостей верстату, оснащеного токарними патронами з адаптивними затискними елементами.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження оцінки впливу параметрів обробки на формування динамічної похибки використано факторне планування експерименту [9], яке дозволяє кількісно оцінити ефекти факторів, їх взаємодії, прийняти оптимальні рішення та зменшити кількість проведення дослідів в порівнянні з однофакторним експериментом.

При визначенні числа факторів враховувалась апріорна інформація, аналіз якої показав, що основними факторами є: подача інструменту на один оберт (X1); швидкість різання (X2); глибина різання (X3); діаметр поверхні затиску оброблюваної заготовки (X4). Всі чотири фактори відповідають поставленим вимогам.

Вибір основного рівня і інтервалів варіювання факторів базувався на аналізі можливих діаметрів затиску, швидкостей різання, подач і глибин різання при напівчистовій обробці (табл. 1). При цьому враховувалась зміна вихідних параметрів в широких межах при високій степені фіксування факторів.

Таблиця 1

Рівні факторів і інтервали їх варіювання

№ з/п	Фактори	Рівні факторів			Інтервал варіювання
		нижній -1	основний 0	верхній +1	
1	Подача, мм/об (X1)	0,11	0,17	0,23	0,06
2	Швидкість різання, об/хв (X2)	590	800	1000	200
3	Глибина різання, мм (X3)	0,4	1,1	1,8	0,7
4	Діаметр оброблюваної заготовки, мм (X4)	65	70	75	5

Аналіз однофакторних залежностей відхилення від круглості від значень факторів, які розглядаються, показав, що вони носять нелінійний характер. Тому в якості моделі для апроксимації результатів експерименту був прийнятий поліном другого порядку [1]:

$$\Delta R = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \bar{X}_i + \sum_{i,l=1}^n b_{il} \bar{X}_i \bar{X}_l + \sum_{i=1}^n b_{ii} \bar{X}_i^2 \quad (1)$$

де ΔR – вихідний параметр (відхилення від круглості); \bar{X}_i, \bar{X}_l – керовані фактори, що впливають на відгук системи; b_0, b_i, b_{il}, b_{ii} – коефіцієнти рівняння регресії.

Реалізація плану експерименту проведена у лабораторних умовах. Оброблялися деталі по режимах згідно розробленого плану експерименту із конструкційної сталі 45 на токарно-гвинторізному верстаті

мод. К62, оснащеному токарним патроном із дослідним зразком адаптивного ЗЕ (рис. 1, а). Деталі мали циліндричну форму різного діаметра (згідно плану експерименту) і довжину 100 мм. Круглограми записувалися на діаграмних дисках в полярних координатах з шириною поля 30 мм і збільшенням $\times 500$ на віддалі 25 мм від торця проточеної частини експериментальних зразків (рис. 1, б).

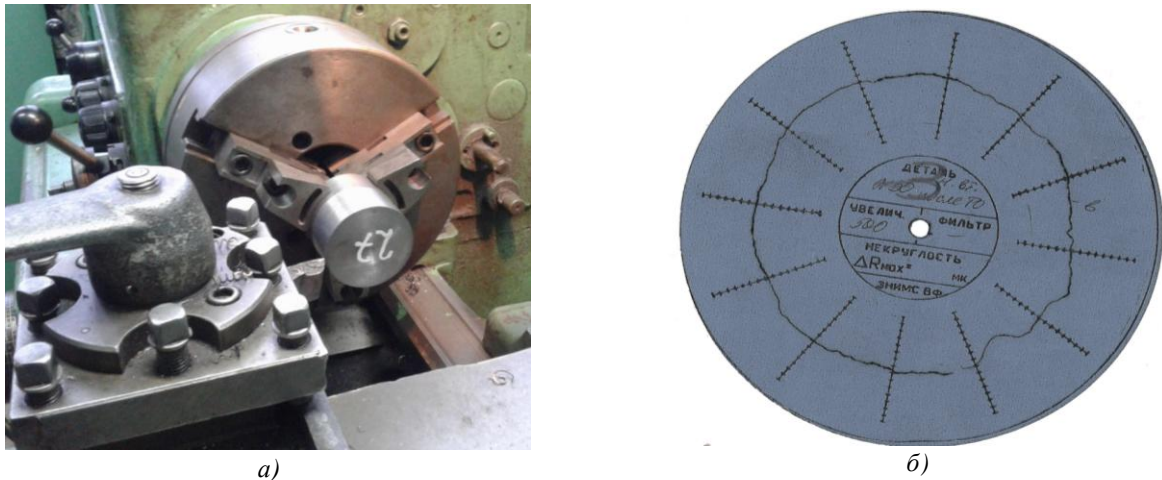


Рис. 1. Обробка деталі, затиснутої у токарному патроні із адаптивними затискними елементами (а) та круглограма обробленої поверхні при діаметрі затиску 65 мм, $t = 0,4$ мм, $s = 0,11$ мм/об, $V = 590$ об/хв. (б)

Отримані відхилення від круглості згідно плану експерименту є точками відгуку системи на дію кожного окремого сполучення факторів. Аналіз результатів експерименту здійснювався за допомогою програмного модуля «Виробнича статистика і експериментальний дизайн» спеціального пакету прикладних програм [11].

Для аналізу експериментальних даних було запущено спеціальний модуль і в якості залежної змінної прийнято ім'я вихідної величини (відхилення від круглості), а в якості незалежних змінних – імена факторів \bar{X}_1 , \bar{X}_2 , \bar{X}_3 , \bar{X}_4 . Для визначення факторів, які чинять найбільший (домінуючий) вплив на відгук системи, проведено дисперсійний аналіз із включенням опції для оцінки головних лінійних і квадратичних ефектів, а також ефектів двох взаємодій, результатом якого є таблиця дисперсійного аналізу (рисунку 2).

Із таблиці дисперсійного аналізу видно, що найбільший вплив на відгук системи чинять такі статистично значимі ефекти як: глибина різання, подача та швидкість різання. Про це також свідчать графіки ефектів нормального розподілу отриманих з використанням програмного модуля, з яких видно, що лінійні члени знаходяться в стороні від лінії нормального розподілу та карта Парето (рисунку 3).

ANOVA: Var.: Delta R; R-sqr= 93763; Adj.: 85824 (2**(4))					
4 factors, 1 Blocks, 26 Runs; MS Residual=6,243656					
DV: Delta R					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)S (L)	445,368	1	445,3682	71,33133	0,000004
S (Q)	9,016	1	9,0156	1,44395	0,254733
(2)V (L)	46,512	1	46,5122	7,44951	0,019600
V (Q)	0,150	1	0,1497	0,02398	0,879752
(3)t (L)	378,658	1	378,6579	60,64683	0,000008
t (Q)	8,119	1	8,1186	1,30030	0,278379
(4)D (L)	0,023	1	0,0232	0,00371	0,952495
D (Q)	0,043	1	0,0429	0,00687	0,935411
1L by 2L	0,003	1	0,0026	0,00042	0,984096
1L by 3L	0,660	1	0,6600	0,10571	0,751181
1L by 4L	8,141	1	8,1405	1,30380	0,277766
2L by 3L	11,278	1	11,2785	1,80639	0,206006
2L by 4L	11,248	1	11,2481	1,80153	0,206574
3L by 4L	1,733	1	1,7335	0,27764	0,608717
Error	68,680	11	6,2437		
Total SS	1101,115	25			

Рис. 2. Таблиця дисперсійного аналізу результатів експерименту:
SS – сума квадратів; df – степінь вільності; MS – середній квадрат; F – критерій Фішера

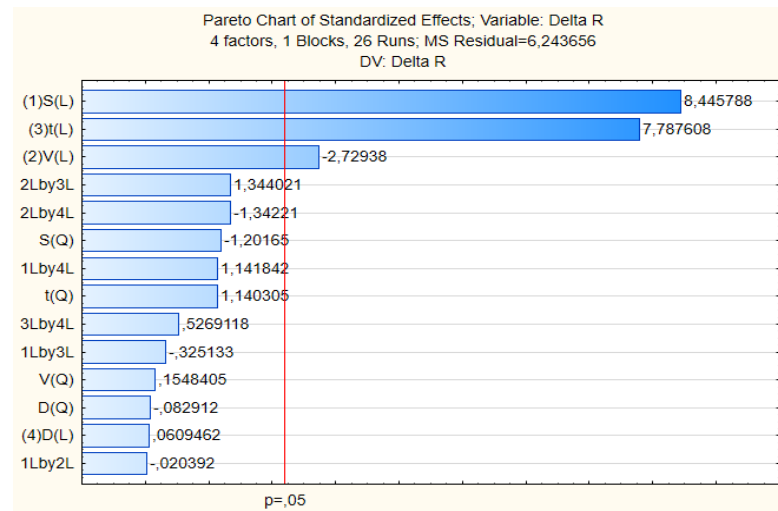


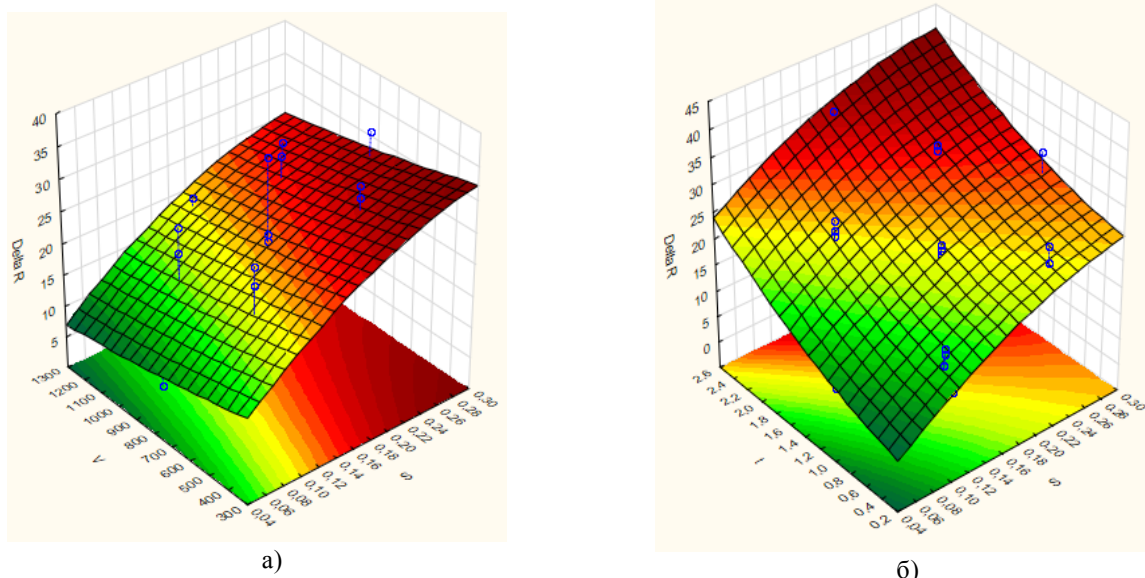
Рис. 3. Карта Парето

Коефіцієнти моделі апроксимації результатів експерименту отримані також з використанням програмного модуля. Модель апроксимації результатів експерименту:

$$\begin{aligned} \Delta R = & 22,06285 + 8,61832 \cdot s - 2,78505 \cdot V + 8,89876 \cdot t + 0,06219 \cdot D - 0,02549 \cdot s \cdot V - \\ & - 0,40283 \cdot s \cdot t + 1,42717 \cdot s \cdot D + 1,66493 \cdot V \cdot t - 1,67743 \cdot V \cdot D + 0,65283 \cdot t \cdot D - \\ & - 1,34264 \cdot s^2 + 0,17297 \cdot V^2 + 1,61576 \cdot t^2 - 0,09264 \cdot D^2 \end{aligned} \quad (2)$$

де ΔR – відхилення від круглості; t, S, V – глибина, подача і швидкість різання відповідно; D – діаметр затиску базової поверхні оброблюваної заготовки.

На рисунку 4 приведені поверхні відгуку для найбільш значимих статистичних ефектів. Приведені поверхні відгуку показують, що найбільший вплив на динамічну похибку чинять лінійні коефіцієнти регресії при факторах S , V та t . При збільшенні t та S некруглість оброблених поверхонь росте, що пояснюється зростанням сил різання і, як наслідок, збільшення відтискань в системі затискний патрон-заготовка.

Рис. 4. Поверхні відгуку ΔR при зміні факторів: а) – S та V ; б) – S та t

Висновки:

1. З використанням факторного планування експерименту, яке дозволяє кількісно оцінити ефекти факторів, їх взаємодії, прийняти оптимальні рішення та зменшити кількість проведення дослідів в порівнянні з однофакторним експериментом, розроблена методика експериментальних досліджень

динамічної похибки обробки деталей в токарних партонах, оснащених адаптивними затискними елементами.

2. Вибрані основні фактори, якими є подача інструменту на один оберт, швидкість різання, глибина різання, діаметр оброблюваної заготовки, та встановлені рівні та інтервали варіювання факторів. В якості моделі для апроксимації результатів експерименту був прийнятий поліном другого порядку.

3. В результаті експериментальних досліджень отримано емпіричну модель оцінки впливу параметрів обробки та діаметра затиску на формування похибки форми (динамічної похибки), що дозволяє прогнозувати вихідні параметри точності при заданих режимах обробки.

4. В результаті дисперсійного аналізу встановлено, що для отримання необхідної точності форми при обробці на верстаті, оснащеному токарним патроном із адаптивними затискними елементами, доцільно керувати найбільш статистично значимими факторами, якими є глибина різання і подача.

Список використаної літератури:

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
2. Волошин В.Н. Експериментальні характеристики швидкопереналагоджуваних затискних патронів з позиційними багатопрофільними затискними елементами / В.Н. Волошин // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету. – 2003. – № 13. – С. 143–149.
3. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием : монография / Ю.Н. Кузнецов, В.Н. Волошин, П.М. Неделчева, Ф.В. Эль-Дахаби. – Габрово : Универ. изд-во «Васил Априлов», 2010. – 724 с.
4. Зажимные механизмы и технологическая оснастка для высокоэффективной токарной обработки : монография / Ю.Н. Кузнецов, О.И. Драчев, И.В. Луцив и др. ; под. ред. Ю.Н. Кузнецова. – Старый Оскол : ТНТ, 2014. – 480 с.
5. Кузнецов Ю.М. Широкодиапазонные и многофункциональные зажимные механизмы: теория и практика : монография / Ю.Н. Кузнецов, В.Г. Кушик, О.Я. Юрчишин. – К. : ООО «ЗМОК» : ООО «ГНОЗИС», 2011. – 424 с.
6. Луцив І.В. Адаптивні елементи механізмів затиску автоматизованого обладнання для токарного оброблення / І.В. Луцив, В.Н. Волошин, Р.О. Бица // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні. – 2013. – Вип. 772. – С. 62–66.
7. Павлов А.Г. Управление динамической точностью при обработке на станках / А.Г. Павлов. – Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1989. – 176 с.
8. Пат. 105514 Україна, МПК⁷ В 23 В 31/10. Адаптивний затискний кулачок / І.В. Луцив, В.Н. Волошин, Р.О. Бица ; патентовласник Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя. – № 201508587 ; заявл. 04.09.2015 ; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.
9. Середя В.Г. Моделирование технологических процессов статистическими методами / В.Г. Середя, В.А. Паламарчук, Я.Е. Пыц. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 84 с.
10. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах : монографія / Ю.М. Кузнецов, І.В. Луцив, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин. – К. ; Тернопіль : Терно-граф, 2011. – 692 с.
11. Халафян А.А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А.А. Халафян. – М. : Либроком, 2013. – 84 с.
12. Bahrke U. Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung : dissertation / U.Bahrke ; Technische Universität Berlin. – Berlin, 1998.
13. Lutsiv I. Adaptation of lathe chucks clamping elements to the clamping surface / I.Lutsiv, V.Voloshyn, R.Bytsa // International journal. Series : Machines, Technologies, Materials. – 2015. – Issue 12. – pp. 64–67.
14. Lutsiv I. Experimental research of deformation zone of adaptive clamping elements for lathe jaws chucks / I.Lutsiv, V.Voloshyn, R.Bytsa // Scientific journal of the Ternopil national technical university. – 2016. – № 2 (82). – pp. 55–61.

References:

1. Adler, Yu.P. (1976), *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh rusloviy*, Nauka, Moskva, 280 p.
2. Voloshyn, V.N. (2003), «Eksperymental'ni harakterytyky shvydkoperenalagodzhuvanykh zatysknykh patroniv z pozycijnymy bagatoprofil'nymy zatysknymy elementamy», *Zbirnik naukovikh prats' Kirovograds'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu*, Seriya *Tekhnika v sil's'kogospodars'komu virobnitstvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatyzatsiya*, No. 13, pp. 143–149.
3. Kuznetsov, Yu.N., Voloshyn, V.N., Nedelcheva, P.M. and El-Dakhabi, F.V. (2010), *Zazhimnye mekhanizmy dlya vysokoproizvoditel'noy i vysokotochnoy obrabotki rezaniem*, Vasil Aprilov, Gabrovo, 724 p.
4. Kuznecov, Ju.N., Drachev, O.I., Luciv, I.V. and others (2014), *Zazhimnye mehanizmy i tehnologicheskaja osnastka dlja vysokoeffektivnoj tokarnoj obrabotki*, monografija, in Kuznecov, Ju.N. (ed.), TNT, Staryj Oskol, 480 p.
5. Kuznetsov, Yu.N., Kushik, V.G. and Yurchishin, O.Ya. (2011), *Shirokodiapazonnye i mnogofunktsional'nye zazhimnye mekhanizmy: teoriya i praktika*, ZMOK, Kiev, 424 p.
6. Lutsiv, I.V., Voloshyn, V.N. and Bytsa, R.O. (2013), «Adaptyvni elementy mekhanizmiv zatysku avtomatyzovanogo obladnannya dlya tokarnogo obroblyennya», *Visnyk Natsional'nogo universytetu L'vivs'ka*

- politekhnika*, Serija *Optimizatsiya vyrobnychkh protsesiv i tekhnichny kontrol' v mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*, No. 772, pp. 62–66.
7. Pavlov, A.G. (1989), *Upravlenie dinamicheskoy tochnost'yu pri obrabotke na stankakh*, Izd-vo Krasnoyarskogo un-ta, Krasnoyarsk, 176 p.
 8. Lutsiv, I.V., Voloshyn, V.N. and Bytsa, R.O., Ternopil'skyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet (2015), МРК В23В31/10. *Adaptivnyi zatysknyi kulachok* [Adaptive tilt cam], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. 105514.
 9. Sereda, V.G., Palamarchuk, V.A. and Pyts, Ya.E. (2010), *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov statisticheskimi metodami*, DGMA, Kramatorsk, 84 p.
 10. Kuznetsov, Yu.M., Lutsiv, I.V., Shevchenko, O.V. and Voloshyn, V.N. (2011), *Tekhnologichne osnashchennya dlya vysokoeffektyvnoi obrobki detaley na tokarnykh verstatakakh*, Terno-graf, Ternopil', 692 p.
 11. Khalafyan, A.A. (2013), *Promyshlennaya statistika: kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA*, Librokom, Moskva, 84 p.
 12. Bahrke, U. (1998), *Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung*, dissertation, TU Berlin, 168 p.
 13. Lutsiv, I., Voloshyn, V. and Bytsa, R. (2015), «Adaptation of lathe chucks clamping elements to the clamping surface», *International journal, Serija Machines, Technologies, Materials*, Issue 12, pp. 64–67.
 14. Lutsiv, I., Voloshyn, V. and Bytsa, R. (2016), «Experimental research of deformation zone of adaptive clamping elements for lathe jaws chucks», *Scientific journal of the Ternopil national technical university*, No. 2 (82), pp. 55–61.

Луців Ігор Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету ім. І.Пулюя.

Наукові інтереси:

– синтез і дослідження верстатно-інструментального оснащення для лезової обробки.

E-mail: liv.tem@ukr.net.

Волошин Віталій Несторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету ім. І.Пулюя.

Наукові інтереси:

– створення та дослідження мобільних затискних систем металорізальних верстатів та затискних механізмів для високошвидкісної обробки.

E-mail: voloshyn@tk.te.ua.

Бица Роман Олегович – інженер, кандидат технічних наук, керівник відділу точного землеробства фірми «Агросем».

Наукові інтереси:

– створення та дослідження адаптивних затискних патронів для токарної обробки.

E-mail: romanbytsa@gmail.com.

Стахурський Олександр Олександрович – аспірант кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету ім. І.Пулюя.

Наукові інтереси:

– дослідження багатолезового верстатно-інструментального оснащення для подрібнення стружки.

E-mail: stahurskyu@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2017.