

DOI 10.32820/2079-1747-2018-22-121-128

УДК 621.9.02

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КЕРОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЗОНІ
РІЗАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ПРОФІЛЮ ОТВОРУ ПІД ЧАС
ОБРОБЛЕННЯ ОСЬОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ**

©Лаппо І. М.¹, Гордєєв А. С.²

Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України¹

Українська інженерно-педагогічна академія²

Інформація про авторів:

Лаппо Ірина Миколаївна: ORCID: 0000-0001-9243-9763; spinnex@i.ua; кандидат технічних наук; старший науковий співробітник відділення наукових досліджень і випробувань вимірювальних систем, метрологічної експертизи відділу наукових досліджень і випробувань вимірювальних систем та метрологічного забезпечення управління наукових досліджень і випробувань інформаційно-вимірювальних систем та метрологічного забезпечення випробувань; Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України; вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна.

Гордєєв Андрій Сергійович: ORCID: 0000-0001-6521-3937; gordeew@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри поліграфічного виробництва і комп'ютерної графіки; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Метою роботи є дослідження робочих процесів у зоні різання під час оброблення отворів і розробка на цій основі практичних рекомендацій щодо підвищення точності оброблення отворів за рахунок зменшення похибки його профілю.

Встановлено найбільш важливі вхідні параметри і визначено ступінь їх впливу на розподіл температури деталі в зоні різання під час оброблення отворів осьовим інструментом. Визначено основні методи усунення або мінімізації спотворення профілю отвору, які полягають в компенсації взаємного впливу різних параметрів на спотворення профілю деталі і диференціації величини найбільш важливих керованих параметрів по глибині отвору.

Встановлено, що найбільше впливає на розбиття отвору швидкість різання. Підвищення швидкості різання в межах дослідженого інтервалу швидкостей призводить до збільшення розбиття отвору через збільшення інтенсивності теплових потоків і збільшення температурних деформацій інструменту та деталі. Збільшення глибини різання та подачі також сприяє збільшенню розбиття отвору, проте їх вплив менш істотний.

Ключові слова: температурні деформації, швидкість різання, осьовий інструмент, керовані параметри, точність оброблення.

Гордєєв А. С., Лаппо І. Н. «Исследование влияния управляемых параметров в зоне резания на точность профиля отверстия при обработке осевым инструментом».

Целью работы является исследования рабочих процессов в зоне резания во время обработки отверстий и разработка на этой основе практических рекомендаций по повышению точности обработки отверстий за счет уменьшения погрешности его профиля.

Установлены наиболее важные входные параметры и определена степень их влияния на распределение температуры детали в зоне резания при обработке отверстий осевым ин-

струментом. Определены основные методы устранения или минимизации искажения профиля отверстия, которые заключаются в компенсации взаимного влияния различных параметров на искажение профиля детали и дифференциации величины наиболее важных управляемых параметров по глубине отверстия.

Установлено, что наибольшее влияние на разбивку отверстия оказывает скорость резания. Повышение скорости резания в пределах исследованного интервала скоростей приводит к увеличению разбивки отверстия из-за увеличения интенсивности тепловых потоков и увеличения температурных деформаций инструмента и детали. Увеличение глубины резания и подачи также способствует увеличению разбивки отверстия, однако их влияние менее существенно.

Ключевые слова: температурные деформации, скорость резания, осевой инструмент, управляемые параметры, точность обработки.

Hordeev A., Lappo I. «Research of the influence of controlled parameters in the cutting zone on the accuracy of the hole profile when treatment with an axial tool».

The relevance of studying the thermophysical processes of machining is due to the fact that the heat released during the cutting operation largely determines the load on the cutting tool, his firmness and also quality and accuracy of the sizes of the processed surfaces.. Therefore, the researches of working processes in the cutting zone during hole machining and the development on this basis of practical recommendations for improving the hole machining accuracy by reducing the error of its profile is an important scientific and practical task in the field of processing by cutting.

The most important input parameters were established and the degree of their influence on the temperature distribution of a detail in the cutting zone when processing holes is defined by the axial tool. The main methods of eliminating or minimizing the distortion of the hole profile are defined, which consist in compensation for the mutual influence of various parameters on the distortion of a profile of a detail and differentiation of magnitude of the most important controlled parameters by the depth of the hole.

It has been established that the cutting speed has the greatest impact on the breakdown of the hole. An increase in the cutting speed within the studied interval of speeds leads to increasing in the breakdown of the hole due to an increase in the intensity of heat fluxes and an increase in temperature deformations of the tool and a detail. Increase in depth of cutting and feed also contributes to an increase in the breakdown of the hole, but their influence is less significantly.

Keywords: temperature deformation, cutting speed, axis tool, controlled parameters, accuracy of treatment.

1. Вступ

Оброблення отворів осьовим інструментом є однією з найбільш відповідальних операцій механічного оброблення, оскільки більшість отворів є базовими поверхнями для інших деталей. Для забезпечення потрібної якості отвору під час його оброблення осьовим лезовим інструментом зазвичай застосовують операції чистового оброблення – розверстування та зенкерування, яким притаманні мінімальні швидкості різання. Однак, навіть такі режими не

дозволяють повністю усунути похибки профілю отвору, який має характерну бочкоподібну форму, що пов'язано з особливостями температурних деформацій деталі та інструменту. Тому для оцінювання точності профілю отвору важливою науковою та практичною задачею є прогнозування температурного стану деталі та інструменту в зоні різання [1].

Відомо, що однією з причин, яка викликає спотворення поперечного профілю отвору під час його оброблення осьовим інструментом є температурні деформації деталі в зоні різання [2, 3]. В роботах [2-6] було показано, що навіть при мінімальних режимах різання, характерних для операцій чистового оброблення отворів, форма профілю отвору має виражений бочкоподібний вид, тому на даний час основними методами усунення або мінімізації спотворення профілю отвору є компенсація взаємного впливу різних параметрів, що впливають на спотворення профілю деталі й диференціація величини найбільш важливих керуємих параметрів по глибині отвору [3]. З урахуванням цього були поставлені завдання виявлення найбільш важливих вхідних параметрів, що впливають на температурні деформації деталі, величиною яких можна керувати при розробленні технологічних процесів чистового оброблення отворів, та визначення ступеня їх впливу.

2. Вплив температурних деформацій на точність оброблення отвору

Відомо, що одним із основних небажаних наслідків впливу температурних деформацій на точність оброблення отвору є спотворення його профілю, яке приймає характерну бочкоподібну форму, що складається із розбиття $\delta_p = (d_{\max} - d_{\text{ном}}) / 2$, яке характеризує максимальне відхилення фактичних розмірів отвору від номінальних, і бочкоподібності $\delta_\sigma = [d_{\max} - (d_k + d_n) / 2] / 2$, яке характеризує відхилення профілю від прямолінійності, де d_{\max} – максимальне значення діаметра обробленого отвору, $d_{\text{ном}}$ – номінальний діаметр отвору, d_n і d_k – діаметр на початку і в кінці отвору після оброблення [4].

Аналіз складових похибки оброблення отвору показав, що при малих швидкостях різання, характерних для чистових операцій оброблення отвору, сумарна похибка діаметра в довільному перерізі отвору залежить від величини температурних деформацій деталі δ_1 і інструмента δ_2 , пружних контактних деформацій деталі δ_3 і інструмента δ_4 по задній поверхні інструмента.

В результаті досліджень [7] було встановлено, що параметри δ_3 і δ_4 практично постійні по всій довжині отвору, а δ_1 і δ_2 мають складну нелінійну залежність від глибини оброблення отвору x . Пружні зміщення контактних поверхонь інструмента δ_4 і деталі δ_3 сприяють усадці отвору, температурні деформації інструмента δ_2 сприяють розбиттю отвору, а темпе-

ратурні деформації деталі δ_1 в залежності від товщини стінок можуть викликати як розбиття отвору, так і його усадку.

Встановлено також, що овальність профілю на початку отвору визначається нелінійністю температурних деформацій інструмента й деталі. Бочкоподібна форма в кінці отвору визначається тільки температурними деформаціями деталі [8, 9]. Фактичний діаметр отвору $d_{\text{факт}}(x)$ визначається як:

$$d_{\text{факт}} = d_{\text{ном}} \pm k_0 \delta_1 + k_0 \delta_2 - \delta_3 - \delta_4,$$

де k_0 – коефіцієнт, який враховує зниження температурних деформацій при охолодженні МОТС.

Для побудови моделі залежності точності оброблення від температури була використана регресійна модель на основі плану ПФЕ 2ⁿ.

$$Q(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = 1,37 + 0,145\delta_1 + 0,15\delta_3 - 0,015\delta_1\delta_4 + \\ + 0,005\delta_2\delta_3 - 0,01\delta_3\delta_4 + 0,015\delta_1\delta_2\delta_3\delta_4$$

Аналіз фахової літератури показав, що на температурний стан зони різання на поверхні деталі під час оброблення отворів впливають не тільки фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, а й режими різання та геометричні розміри деталі. Такі фактори як механічні й теплофізичні властивості матеріалів інструменту та деталі, параметри зносу є некерованими й їхній вплив можна лише враховувати на основі математичного моделювання утворення профілю отвору. Такі фактори як геометрія інструменту та глибина різання є умовно керованими, оскільки їхню величину неможливо змінити безпосередньо в процесі оброблення. Враховуючи можливості сучасного обладнання можна зазначити, що під час оброблення отворів керованими параметрами є швидкість різання та подача [3].

Чисельними дослідженнями встановлена залежність температури в зоні різання при розверстуванні в залежності від режимів різання (рис.1). Виявлено, що основними керованими параметрами, які визначають характер розподілу температур для довільного положення теплового джерела є швидкість різання V , подача S , глибина різання t . Дані дослідження підтверджуються математичною залежністю: $\Theta = C_{\ominus} \cdot V^m \cdot S^n \cdot t^q$, де C_{\ominus} – коефіцієнт, який залежить від роду й механічних властивостей оброблюваного матеріалу та геометричних параметрів інструменту й мастильно-охолоджувальної рідини [10]. При будь-яких видах оброблення величини показників степені неоднакові: $m > n > q$, що підтверджує найбільший вплив швидкості різання на температуру різання. Результати оброблення експериментальних даних дозволяють побудувати модель впливу операцій технологічного процесу на вихідну якість:

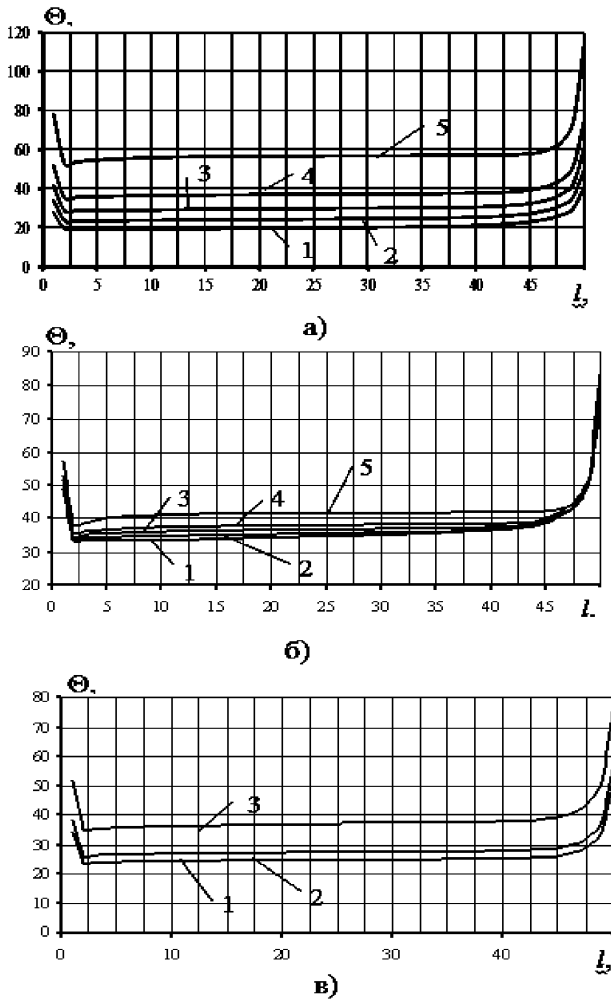


Рис. 1 – Залежність температури в зоні різання: а) від швидкості різання: 1) $V=4$ м/хв.; 2) $V=5$ м/хв.; 3) $V=6,3$ м/хв.; 4) $V=8$ м/хв.; 5) $V=13,3$ м/хв.; б) від подачі: 1) $S=0,4$ мм/об; 2) $S=0,6$ мм/об; 3) $S=0,8$ мм/об; 4) $S=1,2$ мм/об; 5) $S=1,6$ мм/об; в) від глибини різання: 1) $t=0,075$ мм; 2) $t=0,1$ мм; 3) $t=0,2$ мм

$$\Delta d(V, S, t) = \frac{0,0556 + 0,078S^{0,2} - 0,003d_u}{0,0598V}$$

На рис. 2-3 надані графіки, які були отримані за теоретичними розрахунками та експериментальними даними під час свердління. Перевірка однорідності дисперсії при однаковому числі повторних дослідів у всіх точках плану виконувалась за критерієм Кохрена, де $s_{i\max}^2 = 0,028$ на початку отвору, $s_{i\max}^2 = 0,038$ в середині й $s_{i\max}^2 = 0,043$ в кінці отвору, $G_{(0,05;4;8)} = 0,391$ – табличне значення критерію Кохрена при 5 % рівні значущості. Для свердління отвору $G = 0,028/0,126 = 0,222$. Гіпотеза про однорідність дисперсій приймається, оскільки табличні значення G перевищують розрахункові. Відхилення експериментальних даних від теоретичних не перевищує 5 %, що вказує на високу степінь адекватності отриманих моделей.

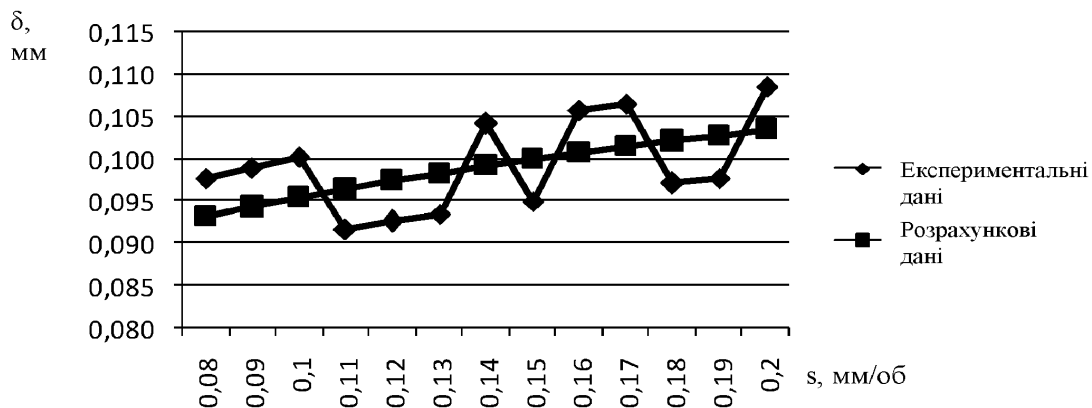


Рис. 2 – Оцінка адекватності моделі залежності точності обробки δ від подачі s при свердлінні: сталь 45, $d = 16$ мм, $l = 25$ мм, $V = 26,28$ м/хв

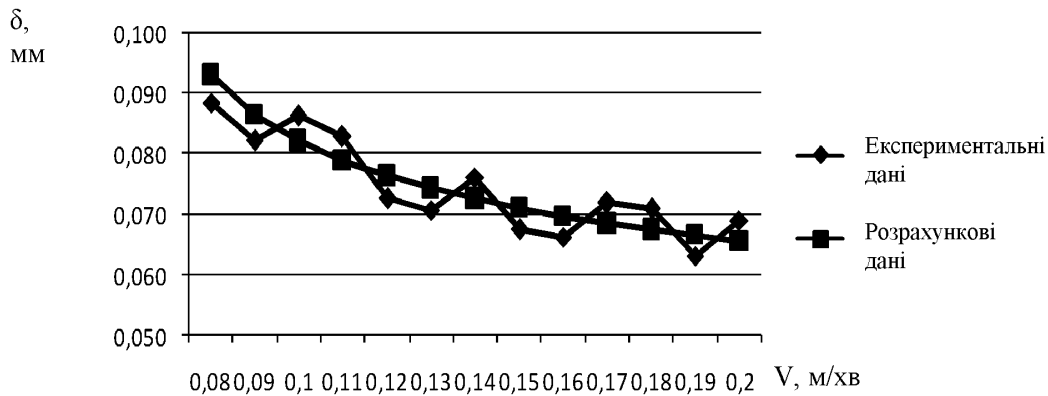


Рис. 3 – Оцінка адекватності моделі залежності точності обробки δ від швидкості різання V при свердлінні: $d = 16$ мм, $l = 25$ мм, $s = 0,08$ м/хв

Експериментальна перевірка показала, що розбиття отвору ($d = 12$ мм) під час свердління: при призначенні режимів за довідником [11, 12] склало $\delta = 15,6$ мкм; за отриманими залежностями $\delta = 12,3$ мкм; розбиття отвору під час зенкерування: при призначенні режимів за довідником [11, 12] склало $\delta = 4,13$ мкм; за отриманими залежностями $\delta = 3,14$ мкм. Таким чином, запропонована методика дозволяє підвищити точність оброблення отворів на 20 – 25 %. У виробничих умовах були проведені експериментальні дослідження відповідно до викладеної методики. Основною метою експерименту була перевірка адекватності результатів чисельного та аналітичного моделювання форми та розмірів подовжнього профілю отвору.

Залежності розбиття отвору в деталі зі Сталі 45 від параметрів режимів різання при свердлінні, зенкеруванні та розверстуванні з обмеженим охолодженням мають вигляд відповідно:

$$\Delta d_c(V, S, t) = 0,2588 + 0,1283V + 3t. \quad (1)$$

$$\Delta d_s(V, S, t) = 1,4736 + 0,6106V + 0,15S + 6,3t. \quad (2)$$

$$\Delta d_p(V, S, t) = -0,4097 + 0,3827V + 0,1687S. \quad (3)$$

Аналогічні залежності, отримані при охолодженні 5 % розчином емульсолу, мають вигляд:

$$\Delta d_c(V, S, t) = 0,2213 + 0,1032V + 2,85t \quad (4)$$

$$\Delta d_s(V, S, t) = 1,1276 + 0,4284V + 0,132S + 5,51t. \quad (5)$$

$$\Delta d_p(V, S, t) = -0,425 + 0,261V + 0,1492S. \quad (6)$$

Аналіз залежностей (1-6) показує, що найбільше впливає на розбиття отвору швидкість різання. Збільшення швидкості різання в межах дослідженого інтервалу швидкостей

призводить до збільшення розбиття отвору (до 3,5 мкм) за рахунок збільшення інтенсивності теплових потоків і збільшення температурних деформацій інструменту та деталі. Збільшення глибини різання та подачі також сприяє збільшенню розбиття отвору, проте їх вплив менш істотний (0,2 мкм при збільшенні подачі й 0,6 мкм при збільшенні глибини різання).

Висновки

В ході проведеного дослідження були вирішені поставлені завдання:

- виявлені найбільш важливі вхідні параметри, що впливають на температурні деформації деталі, величиною яких можна управляти при розробці технологічних процесів чистової обробки отворів – це режими різання: швидкість різання V , подача S , глибина різання t ;
- визначено ступінь їхнього впливу: температурний стан в зоні різання в значній мірі залежить від швидкості різання, в меншій – від подачі і зовсім незначний вплив надає глибина різання.

Невирішеним є питання залежності температурних деформацій від теплофізичних властивостей матеріалу деталі. Насущними і перспективними завданнями подальших досліджень є компенсація взаємного впливу параметрів, що впливають на спотворення профілю деталі і диференціація величини найбільш важливих керованих параметрів по глибині отвору.

Список використаних джерел:

1. Татьяначенко А. Г. Особенности развития тепловых процессов при чистовой обработке отверстий комбинированным осевым инструментом / А. Г. Татьяначенко, И. Н. Лаппо // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт.* – Севастополь, 2013. – Вып. 140/213. – С. 178-183.
2. Резников А. Н. Термоупругие деформации изделия и инструмента в процессе развертывания / А. Н. Резников, Л. Е. Яценко // *Теплофизика технологических процессов : межвед. науч. сб.* – Саратов : Изд. Саратовского ун-та, 1973. – Вып. 1.– С. 24-35.
3. Татьяначенко О. Г. Теоретичні основи прогнозування термопружних деформацій осьового інструменту і деталі і їх вплив на точність обробки отворів : автореф. дис. д-ра техн. наук :05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати і інструменти»/ О. Г. Татьяначенко. – Донецьк : ДонНТУ, 2006. – 36 с.
4. Tatiachenko A.G. Perspectives of heightening of exactitude fair handlings of holes by the axial instrument / A. G. Tatiachenko, I. N. Lappo, T. M. Brizhan // IX Международная конференция «Strategy of Quality in Industry and Education»: Материалы. В 3-х т. – Варна, 2013. – Т. 3. – С. 202-207.
5. Малышко И. А. Температурные деформации детали при обработке отверстий / И. А. Малышко, А. Г. Татьяначенко // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный : сб. науч. тр.* – Донецк, 2001. – Вып.17. – С. 45-51.
6. Малышко И. А. Температурное состояние детали при развертывании отверстий / А. И. Малышко, А. Г. Татьяначенко, С. И. Бочаров // *Вісник інженерної академії.* – Київ, 2001. – №3. – С. 231-233.
7. Лаппо І. М. Удосконалення нормативної документації забезпечення якості лезової обробки отворів : дис.. канд. техн. наук : 05.01.02 / І. М. Лаппо. – Харків, 2016. – 181 с.
8. Даниелян А. М. Резание металлов и инструмент / А. М. Даниелян. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1950. – 454 с.

9. Розенберг Ю. А. Резание материалов : учебник для вузов / Ю. А. Розенберг. – Курган : Зауралье, 2007. – 294 с.
10. Ящерицын Т. И. Теория резания : учеб. / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.
11. Методические указания. Выбор универсальных средств измерения линейных размеров до 500 мм. (По применению ГОСТ 8.051–81): РД 50–98–89 – М. : Изд-во стандартов. – 1987. – 80 с.
12. Силин Р. И. Анализ процесса снятия стружки металла режущим клином / Р. И. Силин, А. А. Мясичев, С. С. Ковальчук // Известия вузов – Машиностроение, 1989. – № 2. – С. 145-148.

References

1. Tatjanchenko, AG & Lappo, IN 2013, 'Osobennosti razvitija teplovyh processov pri chistovoj obrabotke otverstij kombinirovannym osevim instrumentom', *Visnyk Sevastopolskoho natsionalnoho tekhnichnoho universyteta*, Serii: Mashynopryladobuduvannia ta transport, Sevastopol, iss. 140/213, pp. 178-183.
2. Reznikov, AN & Jacenko, LE 1973, 'Termouprugie deformacii izdelija i instrumenta v processe razvertyvanija', *Teplofizika tehnologicheskikh processov*, Izdatelstvo Saratovskogo universiteta, Saratov, iss. 1, pp. 24-35.
3. Tatiachenko, OH 2006, 'Teoretychni osnovy prohnozuvannia termopruzhnykh deformatsii osovoho instrumentu i detali i yikh vplyv na tochnist obrobky otvoriv', *Doct.tech.n. abstract, Donetskyy natsionalnyy tekhnichnyy universytet, Donetsk*.
4. Tatiachenko, AG, Lappo, IN & Brizhan, TM 2013, 'Perspectives of heightening of exactitude fair handlings of holes by the axial instrument', *IX Mezhdunarodnaja konferencija «Strategy of Quality in Industry and Education»*, Varna, vol. 3, pp. 202-207.
5. Malyshko, IA & Tatjanchenko, AG 2001, 'Temperaturnye deformacii detali pri obrabotke otverstij', *Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija*, Doneck, iss.17, pp. 45-51.
6. Malyshko, IA, Tatjanchenko, AG & Bocharov, SI 2001, 'Temperaturnoe sostojanie detali pri razvertyvanii otverstij', *Visnyk inzhenernoi akademii*, Kyiv, no. 3, pp. 231-233.
7. Lappo, IM 2016, 'Udoskonalennia normatyvnoi dokumentatsii zabezpechennia yakosti lezovoi obrobky otvoriv', *Kand.tech.n. thesis, Kharkiv*.
8. Danieljan, AM 1950, *Rezanie metallov i instrument*, Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo mashinostroitelnoj literatury, Moskva.
9. Rozenberg, JuA 2007, *Rezanie materialov*, Zaurale, Kurgan.
10. Jashhericyn, TI, Feldshtejn, EJe & Kornievich, MA 2006, *Teorija rezanija*, 2nd edn, Novoe znanie, Minsk.
11. *Metodicheskie ukazaniya. Vybory universal'nyh sredstv izmerenija linejnyh razmerov do 500 mm. (Po primeneniju GOST 8.051–81): RD 50–98–89 1987*, Izdatelstvo standartov, Moskva.
12. Silin, RI, Mjasishhev, AA & Kovalchuk, SS 1989, 'Analiz processa snjatija struzhki metala rezhushhim klinom', *Izvestija vuzov – Mashinostroenie*, no. 2, pp. 145-148.

Стаття надійшла до редакції 23 листопада 2018 р.