

УДК 621.95.01:681.3

Роп'як Л. Я., канд. техн. наук, Левчук К. Г., канд. техн. наук,
Цідило К. І., Івано-Франківськ, Україна

ВПЛИВ ЕЙЛЕРОВИХ СИЛ НА ТОЧНІСТЬ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ОТВОРІВ ПРИ СВЕРДЛІННІ

Вивчається вплив прецесійного руху та гіроскопічних явищ, що виникають при свердлінні на розбивку отвору. Отримані результати дослідження дозволяють оцінити похибки зміни відхилення у просторі осі просвердленого отвору від заданого положення, різницю діаметрів отвору і свердла відносно базового.

Ключові слова: свердло, гіроскопічний ефект, точність обробки отворів, шпиндельний вузол.

Изучается влияние прецессионного движения и гироскопических явлений, возникающих в процессе сверления на разбивку отверстия. Полученные результаты исследования позволяют оценить погрешности изменения ухода в пространстве оси просверленного отверстия от заданного положения, разницу диаметров отверстий и сверла относительно базового.

Ключевые слова: сверло, гироскопический эффект, точность обработки отверстий, шпиндельный узел.

This paper studies effect of gyroscopic precession movement and the phenomena that occur when drilling holes in the breakdown. The resulting study to assess the error changes in space axis deviation drilled holes from the set position, the difference diameter drill hole and relative to the baseline.

Keywords: drill, gyroscopic effect, precision hole making, spindle hub.

Вступ. У сучасному машинобудуванні підвищення точності, якості та продуктивності механічної обробки деталей машин і механізмів є головною запорукою створення конкурентноспроможної продукції. На даний час деталі з отворами займають вагоме місце в складі машинобудівної продукції різного призначення, а трудомісткість виготовлення отворів у таких деталях може досягати за різними даними близько 20 % від загальної трудомісткості всієї механічної обробки. Технологічні процеси оброблення отворів можна розділити на два класи: заготовка із суцільного матеріалу; заготовка має отвори з припуском для подальшої механічної обробки. У залежності від функціонального призначення отворів у деталях ставляться вимоги до їх точності, шорсткості та взаємного розташування. В зв'язку з цим актуальним завданням є забезпечення високої точності лезової обробки отворів у деталях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механічній обробці отворів приділяється велика увага багатьох дослідників. Підвищенню точності отворів при свердлінні присвячена робота [1], в якій запропоновано конструкторсько-технологічні умови забезпечення якості оброблення за рахунок використання раціональних схем та розташування ріжучих елементів

© Л.Я. Роп'як, К.Г. Левчук, К.І. Цідило, 2014

і поділу припуску на обробку. Дослідження, проведене у [2] розглядає шляхи зменшення вібрацій при обробці отворів.

Проблема точності обробки деталей певною мірою пов'язана із впливом ейлеревих сил інерції: відцентрових та коріолісових. Особливо це актуально при обробці отворів в заготовках із алюмінієвих сплавів. Дія таких сил посилюється зі збільшенням кутової швидкості свердління. Це може призвести до похибок в процесі свердління [3], точіння, свердління, розточування або шліфування [4].

У роботах [3, 4] зроблена спроба дослідити вплив гіроскопічних ефектів, пов'язаних з прецесійним рухом осі шпиндельного вузла верстата і свердла, на розміщення осі отвору відносно заданої бази з використанням наближеної моделі. Однак, вибрана в цих роботах лінійна модель для дослідження виникнення похибок при свердлінні отворів не в повній мірі відображає реальні умови роботи інструменту, не може описати нутаційні рухи.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування умов суттєвого зменшення похибки при свердлінні отворів з урахуванням оцінки впливу гіроскопічного ефекту шляхом побудови нелінійної моделі.

Постановка задачі. Якщо до осі обертання системи шпиндельний вузол верстата – свердло прикладена постійно діюча сила, то згідно гіроскопічної теорії (теорема Резаля) ця вісь зміщається у напрямку, перпендикулярному напрямку дії прикладеної сили – явище прецесії [5]. З теорії гіроскопів відомо, що зі збільшенням кутової швидкості свердління зменшується кутова швидкість прецесії, а отже кут відхилення осі обертання від заданого положення.

У випадку зовнішніх збурень на вісь обертання свердла, окрім прецесійного руху, виникає додатковий нутаційний рух. У цьому випадку спостерігаються пульсаційні тремтіння осі обертання.

Однією з основних похибок при свердлінні є відхилення розміщення осі свердла відносно заданої проектною бази. Розглянемо вплив гіроскопічного ефекту на зміну напрямку цієї осі. Введемо дві системи координат: нерухому $Ox_0y_0z_0$, вісь Ox_0 котрої спрямуємо вздовж осі свердла в положенні статичної рівноваги, і рухому $Oxyz$, осі котрої збігаються з поточним положенням рухомої частини (рис. 1).

Рухома система координат обертається навколо вертикальної осі шпинделя верстата Ox зі сталою кутовою швидкістю ω . Центральні осьові моменти інерції відносно осей, паралельних рухомій системі координат, позначимо $J_{Cx} = J_o$, а $J_{Cy} = J_{Cz} = J_e$. Відцентрові моменти інерції внаслідок симетричності системи дорівнюють нулеві. Відстань між центром ваги системи і ріжучою кромкою свердла позначимо $CK = l_1$, відстань між нижнім

торцем шпинделя і центром ваги системи $AC = l_2$, а відстань між нерухомою точкою і нижньою гранню шпинделя $OA = l_3$ (рис. 1).

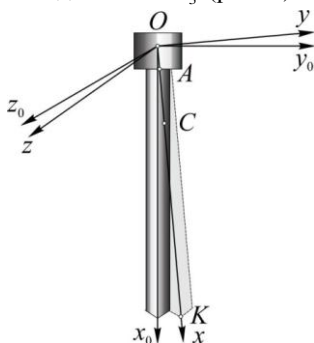


Рисунок 1. Системи координат

Динамічні рівняння руху системи шпиндельний вузол верстата – свердло.

Складемо матрицю перетворення координат і кутової швидкості системи шпиндельний вузол – свердло. Позначимо через γ кут повороту осі свердла в площині Ox_0y_0 (навколо осі Oz_0), через β – кут повороту в площині Ox_1z_1 (навколо осі Oy_1) та через ωt – кут повороту в площині Oy_2z_2 (навколо осі Ox_2). Положення осі OK розглядуваної системи після трьох поворотів зображено на рис. 2.

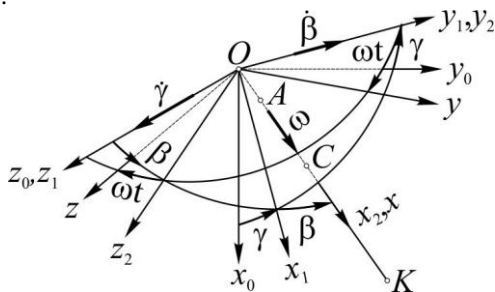


Рисунок 2. Кути повороту осі свердла

Координати довільної точки шпиндельного вузла на осі $Oxyz$ і $Ox_0y_0z_0$ зв'язані між собою співвідношеннями

$$x = (x_0 \cos \gamma + y_0 \sin \gamma) \cos \beta - z_0 \sin \beta;$$

$$y = (-x_0 \sin \gamma + y_0 \cos \gamma) \cos \omega t + (x_0 \cos \gamma + y_0 \sin \gamma) \sin \beta \sin \omega t + z_0 \cos \beta \sin \omega t;$$

$$z = (x_0 \sin \gamma - y_0 \cos \gamma) \sin \omega t + (x_0 \cos \gamma + y_0 \sin \gamma) \sin \beta \cos \omega t + z_0 \cos \beta \cos \omega t,$$

а кутові швидкості залежностями

$$\begin{aligned}\omega_x &= \omega - \dot{\gamma} \sin \beta; \\ \omega_y &= \dot{\beta} \cos \omega t + \dot{\gamma} \cos \beta \sin \omega t; \\ \omega_z &= -\dot{\beta} \sin \omega t + \dot{\gamma} \cos \beta \cos \omega t.\end{aligned}\quad (2)$$

Відповідно до співвідношень (1) координати точки A , що визначає нижнє положення шпинделя, центра ваги C і ріжучої кромки свердла K у рухомій системі координат набувають вигляду

$$\begin{aligned}x_A &= l_3 \cos \gamma \cos \beta; \quad y_A = l_3 (-\sin \gamma \cos \omega t + \cos \gamma \sin \beta \sin \omega t); \\ z_A &= l_3 (\sin \gamma \sin \omega t + \cos \gamma \sin \beta \cos \omega t); \\ x_C &= (l_2 + l_3) \cos \gamma \cos \beta; \quad y_C = (l_2 + l_3) (-\sin \gamma \cos \omega t + \cos \gamma \sin \beta \sin \omega t); \\ z_C &= (l_2 + l_3) (\sin \gamma \sin \omega t + \cos \gamma \sin \beta \cos \omega t); \\ x_K &= (l_1 + l_2 + l_3) \cos \gamma \cos \beta; \\ y_K &= (l_1 + l_2 + l_3) (-\sin \gamma \cos \omega t + \cos \gamma \sin \beta \sin \omega t); \\ z_K &= (l_1 + l_2 + l_3) (\sin \gamma \sin \omega t + \cos \gamma \sin \beta \cos \omega t).\end{aligned}\quad (3)$$

До системи шпиндельний вузол верстата – свердло прикладені (рис. 3): \vec{P} – осьова сила подачі свердла, прикладена вздовж його осі, \vec{M}_{kp} – крутний момент, $\vec{F}_{pr} = -c \cdot \Delta \vec{r}$ – пружна реакція, розміщена у площині Oyz) і прикладена до шпиндельного вузла в точці A , $m\vec{g}$ – вага системи, \vec{R}_2 (розміщена в площині Oyz , перпендикулярній осі свердла) і \vec{R}_1 – рівнодійні сили на ріжучих кромках свердла.

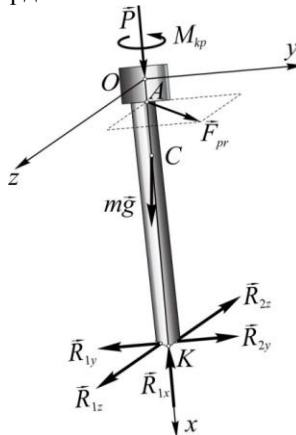


Рисунок 3. Навантаження, прикладені до системи шпиндель верстата – свердло

Для складання диференціальних рівнянь руху скористаємось рівнянням Лагранжа другого роду. Кінетична енергія й елементарна робота системи шпиндельний вузол – свердло на заданих можливих кутових переміщеннях з урахуванням виразів для кутових швидкостей (2) та координат точок (3), в яких прикладені сили, мають вигляд

$$T = \frac{1}{2} J_o (\omega - \dot{\gamma} \sin \beta)^2 + \frac{1}{2} [J_e + m(l_2 + l_3)^2] (\dot{\beta}^2 + \dot{\gamma}^2 \cos^2 \beta); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta A = & -mg(l_2 + l_3)(\sin \beta \cos \gamma \delta \beta + \cos \beta \sin \gamma \delta \gamma) - cl_3^2 \left[\left(\begin{aligned} & \sin \beta \cos \gamma \delta \beta + \\ & + \cos \beta \sin \gamma \delta \gamma \end{aligned} \right) \times \right. \\ & \times (1 - \cos \beta \cos \gamma) + \left(\begin{aligned} & \cos \beta \cos \gamma \sin \omega t \delta \beta - \left(\begin{aligned} & \cos \gamma \cos \omega t + \\ & + \sin \beta \sin \gamma \sin \omega t \end{aligned} \right) \delta \gamma \end{aligned} \right) \times \\ & \times \left(\begin{aligned} & -\sin \gamma \cos \omega t + \\ & + \sin \beta \cos \gamma \sin \omega t \end{aligned} \right) + \left(\begin{aligned} & \cos \beta \cos \gamma \cos \omega t \delta \beta + \left(\begin{aligned} & \cos \gamma \sin \omega t \\ & - \sin \beta \sin \gamma \cos \omega t \end{aligned} \right) \delta \gamma \end{aligned} \right) \times \\ & \times \left(\begin{aligned} & \sin \gamma \sin \omega t + \\ & + \sin \beta \cos \gamma \cos \omega t \end{aligned} \right) \left. \right] + (l_1 + l_2 + l_3) [R_{1x} (\sin \beta \cos \gamma \delta \beta + \cos \beta \sin \gamma \delta \gamma) + \\ & + (R_{2y} - R_{1y}) \left(\begin{aligned} & \cos \gamma \cos \omega t - \\ & - \sin \beta \sin \gamma \sin \omega t \end{aligned} \right) \delta \gamma + \cos \beta \cos \gamma \sin \omega t \delta \beta] + (R_{2z} - R_{1z}) \times \\ & \times (\cos \beta \cos \gamma \cos \omega t \delta \beta + (\cos \gamma \sin \omega t - \sin \beta \sin \gamma \cos \omega t) \delta \gamma) - M_{kp} \sin \beta \delta \gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо позначити реакції $R_{1x} = R_x$, $\Delta R_y = R_{2y} - R_{1y}$ і $\Delta R_z = R_{2z} - R_{1z}$, то після підстановки виразів (4) і (5) в рівняння Лагранжа другого роду отримуємо систему нелінійних рівнянь

$$\begin{aligned} J_o (\ddot{\gamma} \sin \beta + \dot{\beta} \dot{\gamma} \cos \beta) = & - [(\Delta R_y \sin \omega t + \Delta R_z \cos \omega t) \sin \gamma + \\ & + (\Delta R_y \cos \omega t - \Delta R_z \sin \omega t) \sin \beta \cos \gamma] (l_1 + l_2 + l_3); \\ [J_e + m(l_2 + l_3)^2] \ddot{\beta} - \frac{1}{2} [J_o - J_e - m(l_2 + l_3)^2] \dot{\gamma}^2 \sin 2\beta + J_o \omega \dot{\gamma} \cos \beta = & \\ [-(mg(l_2 + l_3) + cl_3^2 + R_x(l_1 + l_2 + l_3)) \sin \beta + (\Delta R_y \sin \omega t + \Delta R_z \cos \omega t) \times & \\ \times (l_1 + l_2 + l_3) \cos \beta] \cos \gamma; & \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[J_e \sin^2 \beta + \left(J_e + m(l_2 + l_3)^2 \right) \cos^2 \beta \right] \ddot{\gamma} + \left[J_o - J_e - m(l_2 + l_3)^2 \right] \dot{\beta} \dot{\gamma} \sin 2\beta - \\ & J_o \omega \dot{\beta} \cos \beta = \left[- \left(mg(l_2 + l_3) + cl_3^2 + R_x(l_1 + l_2 + l_3) \right) \cos \beta - \right. \\ & \quad \left(\Delta R_y \sin \omega t + \Delta R_z \cos \omega t \right) (l_1 + l_2 + l_3) \sin \beta \left. \right] \sin \gamma + \\ & \quad + \left(\Delta R_y \cos \omega t + \Delta R_z \sin \omega t \right) (l_1 + l_2 + l_3) \cos \gamma. \end{aligned}$$

Складність динамічного аналізу системи шпиндельний вузол верстата – свердло полягає в неможливості точного аналітичного дослідження, оскільки динаміка описується системами диференціальних (6), або диференціально-алгебраїчних рівнянь, є нелінійними, розв’язок яких аналітично одержати неможливо. З іншого боку, саме складання рівнянь, що описують прецесійні та нутаційні рухи осі свердла є досить непростою процедурою. Окрім того, постійний ріст вимог до точності обробки отворів при свердлінні вимагає розв’язання ускладнених динамічних моделей. З одного боку, щоб отримати якомога точніші рішення, необхідно підвищувати врахування степені мализни кутів повороту осі свердла. З іншого боку, уточнюються і ускладнюються математичні моделі системи, що досліджується. Нарешті, спостерігається тенденція до скорочення термінів, необхідних для параметричного дослідження.

Тому, в силу описаних вище причин, можливості аналітичних методів дослідження динаміки системи шпиндельний вузол верстата – свердло різко обмежені і у сучасних умовах для розв’язання таких задач слід застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення. На даний час існує загальноприйнята тенденція, що вивчати динаміку механічних систем можна за допомогою комп’ютерного моделювання.

Зупинимось на дослідженні динамічних рівнянь, обмежившись малими коливанням системи (6) з точністю до величин першого порядку мализни

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\beta} + J_o \omega \dot{\gamma} + M_1 \beta &= (\Delta R_y \sin \omega t + \Delta R_z \cos \omega t) l; \\ J_1 \ddot{\gamma} - J_o \omega \dot{\beta} + M_1 \gamma &= (\Delta R_y \cos \omega t + \Delta R_z \sin \omega t) l, \end{aligned} \quad (7)$$

де $J_1 = J_e + m(l_2 + l_3)^2$, $M_1 = mg(l_2 + l_3) + cl_3^2 + R_x l$, $l = l_1 + l_2 + l_3$.

Розв’язок системи диференціальних рівнянь (7) має вигляд

$$\begin{aligned} \beta = & C_1 \sin \omega_1 t + C_2 \cos \omega_1 t + C_3 \sin \omega_2 t + C_4 \cos \omega_2 t + \frac{l}{(M_1 - J_1 \omega^2)^2 - J_o^2 \omega^4} \times \\ & \times \left[(M_1 + (J_o - J_1) \omega^2) \Delta R_y \sin \omega t + (M_1 - (J_o + J_1) \omega^2) \Delta R_z \cos \omega t \right]; \\ \gamma = & \frac{M_1 - J_1 \omega_1^2}{J_o \omega \omega_1} (C_1 \cos \omega_1 t - C_2 \sin \omega_1 t) + \frac{M_1 - J_1 \omega_2^2}{J_o \omega \omega_2} \left(C_3 \cos \omega_2 t - \right. \\ & \left. + \frac{l}{(M_1 - J_1 \omega^2)^2 - J_o^2 \omega^4} \left[(M_1 - (J_o + J_1) \omega^2) \Delta R_z \sin \omega t + \right. \right. \\ & \left. \left. + (M_1 + (J_o - J_1) \omega^2) \Delta R_y \cos \omega t \right] \right), \end{aligned} \quad (8)$$

де $\omega_{1,2} = \sqrt{M_1 + \frac{J_o \omega}{2J_1} (J_o \omega \pm \sqrt{4J_1 M_1 + J_o^2 \omega^2})}$ – власні частоти, C_i ($i = \overline{1,4}$) –

сталі інтегрування, які залежать від початкових умов руху наступним чином

$$\begin{aligned} C_1 = & \frac{\omega_1}{M_1 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left[J_o \omega \omega_2^2 \gamma_0 - (M_1 - J_1 \omega_2^2) \dot{\beta}_0 + \frac{M_1 - (J_o + J_1) \omega^2}{(M_1 - J_1 \omega^2)^2 - J_o^2 \omega^4} \times \right. \\ & \left. \times (M_1 - (J_o + J_1) \omega_2^2) \omega \Delta R_y l \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C_2 = & -\frac{1}{J_1 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left[J_o \omega \dot{\gamma}_0 + (M_1 - J_1 \omega_2^2) \beta_0 - \frac{M_1 - (J_o + J_1) \omega^2}{(M_1 - J_1 \omega^2)^2 - J_o^2 \omega^4} \times \right. \\ & \left. \times (M_1 + J_o \omega^2 - J_1 \omega_2^2) \Delta R_z l \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} C_3 = & -\frac{\omega_2}{M_1 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left[J_o \omega \omega_1^2 \gamma_0 - (M_1 - J_1 \omega_1^2) \dot{\beta}_0 - \frac{M_1 + (J_o - J_1) \omega^2}{(M_1 - J_1 \omega^2)^2 - J_o^2 \omega^4} \times \right. \\ & \left. \times (M_1 - (J_o + J_1) \omega_1^2) \omega \Delta R_y l \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_4 = & \frac{1}{J_1 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left[J_o \omega \dot{\gamma}_0 + (M_1 - J_1 \omega_1^2) \beta_0 - \frac{M_1 - (J_o + J_1) \omega^2}{(M_1 - J_1 \omega^2)^2 - J_o^2 \omega^4} \times \right. \\ & \left. \times (M_1 + J_o \omega^2 - J_1 \omega_1^2) \Delta R_z l \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

При нульових початкових умовах у радіальному напрямку малі коливання системи шпиндельний вузол верстата – свердло згідно (8) – (12) можна обчислити за формулами

$$\beta = \frac{M_1 + (J_o - J_1)\omega^2}{(M_1 - J_1\omega^2)^2 - J_o^2\omega^4} \Delta R_y l \left\{ \frac{\omega}{M_1(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left[(M_1 - (J_o + J_1)\omega_2^2) \times \right. \right. \\ \left. \times \omega_1 \sin \omega_1 t + (M_1 - (J_o + J_1)\omega_1^2) \omega_2 \sin \omega_2 t \right] + \sin \omega t \Big\}; \\ \gamma = \frac{M_1 + (J_o - J_1)\omega^2}{(M_1 - J_1\omega^2)^2 - J_o^2\omega^4} \Delta R_y l \left\{ \frac{1}{M_1 J_o (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \left[(M_1 - J_1\omega_1^2) \times \right. \right. \\ \times (M_1 - (J_o + J_1)\omega_2^2) \cos \omega_1 t + (M_1 - J_1\omega_2^2) \times \\ \left. \times (M_1 - (J_o + J_1)\omega_1^2) \cos \omega_2 t \right] + \cos \omega t \Big\} \quad (13)$$

Тоді коливання осі свердла в зоні розташування його ріжучої кромки, які спричиняють виникнення похибок механічної обробки заготовки деталі відповідно до (3) у радіальному напрямку визначаються з виразів

$$y_K = (l_1 + l_2 + l_3)(-\gamma \cos \omega t + \beta \sin \omega t); \\ z_K = (l_1 + l_2 + l_3)(\gamma \sin \omega t + \beta \cos \omega t). \quad (14)$$

Висновки. Побудована математична модель коливального руху свердла, що враховує його відхилення в радіальному напрямку. Ця модель враховує гіроскопічний ефект, який виникає внаслідок швидкого обертального руху свердла.

За основною властивістю гіроскопії зі збільшенням кутової швидкості свердління амплітуда коливань системи шпиндельний вузол верстата – свердло зменшується, і як наслідок, зменшується похибка обробки отворів.

Зазначимо також, особливо важливо обчислювати похибку свердління на початку обробки, оскільки зі збільшенням глибини свердління розбивка отвору зменшується за рахунок сил тертя між власне самим свердлом і матеріалом заготовки.

У подальших дослідженнях планується оцінити похибку обробки отворів при горизонтальному розташуванні осі шпинделя верстата.

Список використаних джерел: 1. Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П.Д. Кривий, В.В. Крупа, В.І. Продан // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15, № 1. – С. 147 – 156. 2. Брижан Т.М. Технологическое обеспечение безвибрационной обработки отверстий / Т.М. Брижан, С.А. Дитиненко // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. Серія «Іноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 43 (1086). – С. 13 – 19. 3. Кабалоев Ю.Ж. Влияние гироскопического эффекта на точность обработки при сверлении / Ю.Ж. Кабалоев, М.Б. Гукьямухов // Вопросы точности и конструирования в машиностроении: труды СКГМИ. – Орджоникидзе, 1970. – Вып. XXVII. – С. 25 – 30. 4. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков: изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. 145 с. 5. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман: учебн. для студ. высш. учебн. зав. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kryvyy P.D. Konstruktors'ko-tekhnologichni peredumovy pidvyshchennya yakosti obroblyennya hlybokyykh otvoriv tonkostinnykh tsylindriv / P.D. Kryvyy, V.V. Krupa, V.I. Prodan // Visnyk TDTU. – 2010. – Tom 15, № 1. – S. 147 – 156. 2. Bryzhan T.M. Tekhnologicheskoe obespechenye bezvybratsyonnoy obrabotky otverstyy / T.M. Bryzhan, S.A. Dytynenko / Visnyk NTU «KhPI»: zb. nauk. pr. Seriya «Inovatsiyni tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi». – Kh: NTU «KhPI», 2014. – № 43 (1086). – S. 13 – 19. 3. Kabaloev Yu.Zh. Vlyyanye hyroskopicheskoho effekta na tochnost' obrabotky pry sverlenyy / Yu.Zh. Kabaloev. M.B. Huk'yamukhov // Voprosy tochnosti y konstruyrovanyya v mashynostroenyy: trudy SKHMY. – Ordzhonykydze, 1970. – Vyp. XXVII. – S. 25 – 30. 4. Kolev K.S. Tochnost' obrabotky y rezhymy rezanyya / K.S. Kolev, L.M. Horchakov: yzd. 2-e, pererab. y dop. – M.: Mashynostroenye, 1976. 145 s. 5. Byderman V. L. Teoryya mekhanicheskyykh kolebanyy / V.L. Byderman: uchebn. dlya stud. vysh. uchebn. zav. – M.: Vysshaya shkola, 1980. – 408 s.

Надійшла до редколегії 27.10.2014