

Наведено методичку визначення обмежень гранично-го алгоритму управління шліфуванням робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб. Представлено результати проведених експериментів по визначенню жорсткості технологічної обробляючої системи і показників якості обробленої поверхні оправки від режимів різання. Розроблена методика використовуються при проектуванні управляючих програм шліфування робочої поверхні оправки на Нікопольському трубному заводі ПАТ «Сентравіс Продажин Юкрейн» (Україна)

Ключові слова: шліфування, оправка станів холодної прокатки труб, граничний алгоритм управління

Приведена методика определения ограниченной граничного алгоритма управления шлифованием рабочей поверхности оправки станов холодной прокатки труб. Представлены результаты проведенных экспериментов по определению жесткости технологической обрабатывающей системы и показателей качества обработанной поверхности оправки от режимов резания. Разработанная методика используются при проектировании управляющих программ шлифования рабочей поверхности оправки на Никопольском трубном заводе ЧАО «Сентравис Продажин Юкрейн» (Украина)

Ключевые слова: шлифование, оправка станов холодной прокатки труб, граничный алгоритм управления

УДК 621.923

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39042

УПРАВЛІННЯ ШЛІФУВАННЯМ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ОПРАВКИ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ

Ю. В. Петраков

Доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри*

E-mail: yp-86@yandex.ru

С. М. Чамата

Аспірант*

E-mail: chamatik@ukr.net

*Кафедра технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Виготовлення безшовних труб виконується на станах холодної прокатки труб (ХПТ), що реалізують процес пільгерування (рис. 1, а), при якому деформування заготовки 1 в трубу 2 необхідного діаметру відбувається за рахунок взаємодії з робочими поверхнями калібрів 3 і оправки 4 (рис. 1, б), які мають складні форми [1, 2].

Обов'язковими конструктивними елементами оправки є хвостова частина з різьбою для кріплення оправки до оправочного стрижня, перехідна циліндрична частина, власне робоча частина з криволінійною утворюючою і конічна частина (рис. 1, б).

Оправка за своїми геометричними параметрами належить до деталей малої жорсткості (відношення довжини до діаметра 50...80) і має складну робочу поверхню круглого перерізу, але зі зміною координати x за довжиною z за спеціальним законом:

$$x_i = 0.5 \left[d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min} - kL_r) \left(\frac{z_i}{L_r} \right)^n + kz_i^2 \right], \quad (1)$$

де d_{\min} , d_{\max} – мінімальний і максимальний діаметри робочої частини оправки, L_r – довжина робочої частини, k – початкова конусність, n – показник степеня.

Оправки станів ХПТ виготовляються зі спеціальної сталі (Сталь 60С2ХФА, твердість HRC 54..58, Сталь S 690 BOHLER, твердість HRC 58..64 тощо), мають

жорсткі вимоги до точності (допуск на діаметр робочої частини $\pm 0,02$ мм) та якості поверхні ($Ra=0.16$ мкм). Заключна операція виготовлення оправок станів ХПТ є шліфування робочої поверхні, яка виконується на шліфувальному верстаті з ЧПК 3М152МВФ3 (рис. 2, а), який був обладнаний системою ЧПК фірми Siemens 2, і спеціальним лонетом 1, який забезпечує підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи (ТОС) в не залежності від зміни діаметру оправки за довжиною [3]. У відповідності до технологічного процесу на операцію шліфування робочої поверхні, яка є заключною, передбачається значний припуск – 1 мм на сторону і більше, а ураховуючи криволінійну утворюючу в середині робочої поверхні припуск може перевищувати 2 мм на сторону.

Шліфування робочої поверхні оправки 1 стану ХПТ шліфувальним кругом 2 відбувається за рахунок трьох рухів: повздовжньої подачі $F_{\text{пов}}$ на оберт заготовки, поперечної подачі на прохід $F_{\text{поп}}$ і обертання p_d заготовки навколо своєї осі Z (рис. 2, б). Підвищення жорсткості ТОС досягається шляхом застосування спеціального лонета 3. Контроль оправки вимагає перевірки відповідності її 3D форми кресленню, а точніше таблиці діаметрів, розрахованої за формулою (1). Такий контроль здійснюється безпосередньо на верстаті вимірювальним щупом фірми Heidenhain [4, 5] за технологією яка описана в [6].

Процес шліфування оправки здійснюється на верстаті з ЧПК і як для будь-якої іншої складної поверхні завжди супроводжується квазістаціонарними умова-

ми різання. Отже, технологічна підготовка операції вимагає використання спеціальної САМ системи [7], в якій обов'язково має бути вирішена не тільки задача геометричного формоутворення, а й призначення режиму різання, що забезпечить виконання умов за якістю при мінімальному часі оброблення. Тому розроблення методики, втіленій у спеціальному модулі САМ системи для автоматичного проектування закону управління режимом шліфування є актуальною науково-технічною задачею.

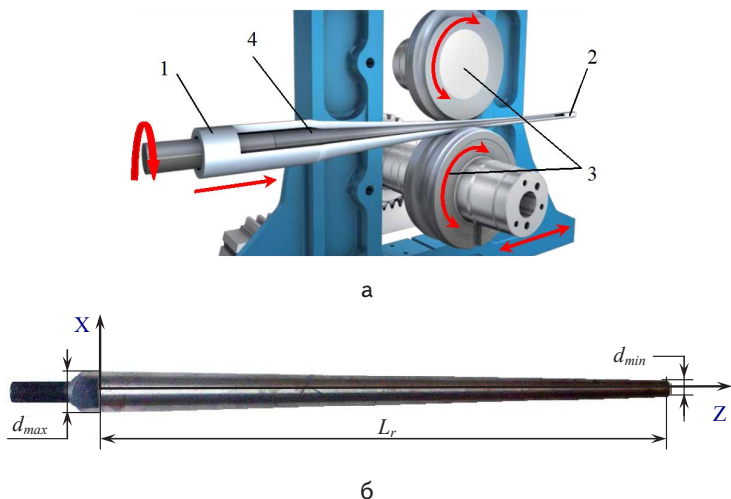


Рис. 1. Виготовлення безшовних труб: а – схема процесу пільгування; б – оправка стану ХПТ

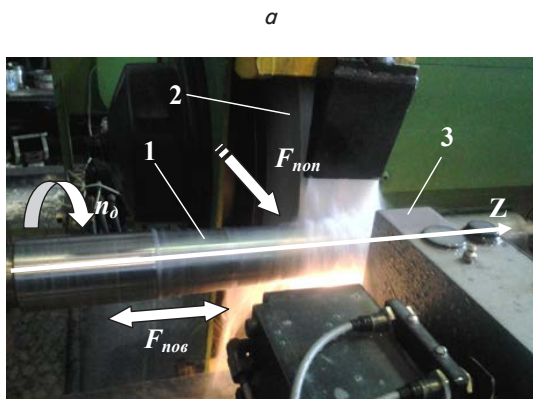


Рис. 2. Операція шліфування робочої поверхні оправки ХПТ: а – загальний вигляд верстата 3М152ВФ20; б – схема рухів

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для вивчення процесів, що відбуваються при обробці різанням, і закономірностей, встановлення функціональних зв'язків між технологічними параметрами, режимом обробки та показниками якості використовується математичне моделювання [8–10].

В результаті впливу технологічних факторів, формування якості і точності поверхні деталі може бути нестабільним [9–11]. Для забезпечення необхідних показників обробки необхідно управляти технологічним процесом, тобто здійснювати цілеспрямовану зміну технологічних факторів, яка повинна привести до бажаного результату. Як наголошується в роботі [12], ефективність управління визначається вибором математичної моделі, можливості її існування і ступенем її адекватності реальним умовам обробки.

Відомо, що для будь-якого процесу різання як і для шліфування, геометричні параметри шару припуску, який зрізується, є такими, що визначатимуть всі основні характеристики процесу. Такий параметр залежить від форми заготовки, форми інструментальної поверхні і траєкторії формоутворення. Дослідження процесу шліфування [13] дозволили установити головну характеристику процесу шліфування, якою є швидкість зрізування припуску (MRR – Material Removal Rate), за якою можна оцінювати як інтенсивність процесу, так і якість обробленої поверхні, графік зміни якої повинен розташовуватися в області допустимих значень (рис. 1), яка визначається граничним алгоритмом [13–15]. Тим самим гарантується максимальна продуктивність при виконанні вимог щодо якості (шорсткості, відсутності дефектів поверхневого шару і т. п.) та точності обробленої поверхні.

Граничний алгоритм формується у фазовій площині «припуск – швидкість зрізування припуску» і визначається двома лініями (рис. 3). Лінія 1 визначається з умов максимально допустимої сили різання (визначається допустимою деформацією ТОС), а лінія 2 – з умов бездефектного шліфування.

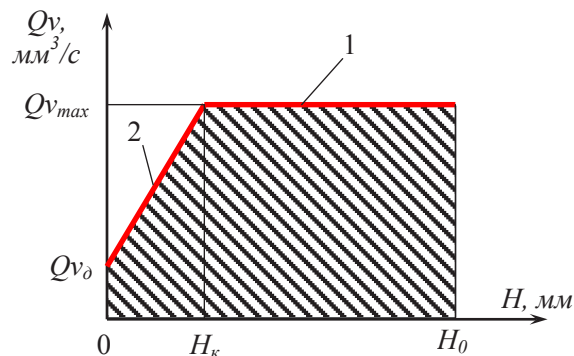


Рис. 3. Граничний алгоритм

Таким чином процес шліфування повинен відбуватися спочатку до критичної величини припуску H_k , що залишився, з максимально допустимою швидкістю Qv_{max} зрізування припуску (лінія 1), а потім за лінією

2 і закінчуватись при швидкості зрізування припуску $Q_{vд}$, яка забезпечить необхідну якість та шорсткість поверхневого шару деталі. Особливістю застосування такого алгоритму управління є те, що він не передбачає такого етапу циклу шліфування, як виходжування, коли процес закінчується за рахунок накопичених на попередніх етапах циклу пружних деформацій ТОС при шліфуванні і є, по-суті, некерованим.

Але відсутність системного підходу до визначення обмежень граничного алгоритму шліфування складно профільних деталей, обробка яких супроводжується квазістаціонарністю процесу і до яких відноситься оправка станів ХПТ, обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є, на базі граничного алгоритму зрізування припуску, адаптованого до шліфування складних поверхонь, розроблення методики визначення оптимального режиму різання при шліфування оправок станів ХПТ, яка втілена в модулі автоматизованого проектування управляючих програм для шліфувального верстату з ЧПК.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити максимально допустиму швидкість зрізування припуску при максимально допустимій деформації ТОС, для чого необхідно провести експериментальні дослідження по визначенню жорсткості ТОС.

2. Визначити швидкість зрізування припуску в кінці циклу, яка забезпечить необхідну шорсткість і відсутність припалів обробленої поверхні, для чого необхідно провести експериментальні дослідження по визначенню математичної моделі залежності параметрів якості обробленої робочої поверхні оправки станів ХПТ від швидкості зрізування припуску.

3. Розробити програмний засіб для визначення зв'язку швидкості зрізування припуску при шліфуванні робочої поверхні оправки (плями контакту) з граничним алгоритмом управління і на цій основі розрахувати величину критичного припуску граничного алгоритму управління режимом різання.

4. Створити модуль автоматизованого проектування закону управління режимом різання в САМ системі підготовки управляючих програм для шліфувальних верстатів з ЧПК.

4. Вирішення задачі визначення параметрів, що обумовлюють обмеження граничного алгоритму для шліфування робочої поверхні оправки

Отже, для формування закону управління перш за все необхідно визначити обмеження з урахуванням специфіки процесу шліфування робочої поверхні оправки ХПТ. Обмеження за лінією 1 (рис. 3) визначається максимально допустимою деформацією $\delta_{доп}$ ТОС і нормальною складовою сили різання P_x , що викликає цю деформацію:

$$P_x = 2,5C_p Q_v^\alpha, \quad (2)$$

де C_p і α – коефіцієнт і показник степеня, які залежать від матеріалу заготовки і шліфувального круга, Q_v – швидкість зрізування припуску (MRR). Для умов шліфування оправки КРВ-25, матеріал заготовки сталь 60С2ХФА, кругом 25А ПП 600х80х100 32 СМ1: $C_p = 0,78$, $\alpha = 0,6$.

Оскільки деформація пружної ТОС $\delta = P_x / C$, де C – жорсткість ТОС при закріпленні заготовки в центрах (з урахуванням люнету), то залежність для обрахунку верхньої границі алгоритму управління приймає вигляд:

$$Q_{v_{max}} = \left(\frac{0,4 \cdot C \cdot \delta_{доп}}{C_p} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (3)$$

де C_p і α – коефіцієнт і показники степеня, які залежать від матеріалу заготовки і шліфувального круга, $\delta_{доп}$ – величина допустимої деформації ТОС, яку обрано з міркувань сталого шліфування (відсутність вібрацій), C – жорсткість ТОС при закріпленні заготовки (з урахуванням люнету).

Жорсткість ТОС шліфувального верстата залежить від багатьох факторів, в тому числі від розмірів заготовки і способу її встановлення, тому визначення жорсткості ТОС доцільно виконувати за експериментальними даними.

Жорсткість ТОС шліфувального верстата визначалась експериментально на модернізованому круглошліфувальному верстаті з ЧПК 3К152ВФ20. На рис. 4 представлено робочу зону верстату під час проведення експерименту. Експерименти виконувались при навантаженні ТОС за рахунок переміщення шліфувального круга 1 в напрямку оправки 2 через динамометр 3, яким вимірювалась сила навантаження.

Для вимірювання деформації ТОС на станині верстату встановлено індикатор 4 з ціною поділки 1 мкм (рис. 4, а, б). Виміри проводились для оправки КРВ-25, що будуть оброблятися на верстаті, матеріал заготовки сталь 60С2ХФА, хімічний склад та фізико механічні властивості відповідно до ГОСТ 14959-79.

За результатами вимірювань побудовані графіки, що представлені на рис. 5.

Шукана жорсткість одночасно є коефіцієнтом лінійної залежності деформації від сили навантаження, який можливо визначити методом найменших квадратів за формулою:

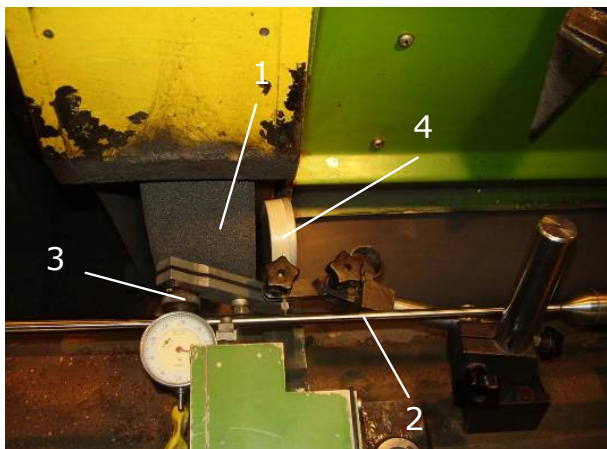
$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i)^2}{\sum_{i=1}^n P_i (\Delta_{нав.})_i} = \frac{1958070}{653.679} = 2995.46 \text{ Н/мм}, \quad (4)$$

де P_i – сила навантаження, $(\Delta_{нав.})_i$ – деформація в i -ій точці вимірювань.

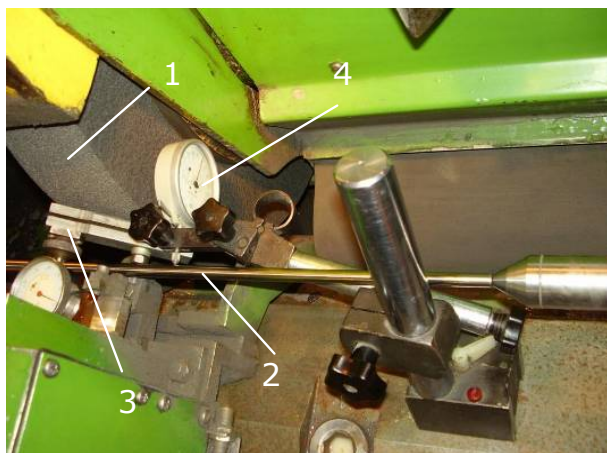
Границю по лінії 2 (рис. 3), лінії припалу, визначають два параметри: швидкість зрізування припуску $Q_{vд}$ в кінці циклу і критична величина H_k припуску. Ці величини можуть бути визначені тільки на основі обробки експериментальних даних по дослідженню залежностей показників якості (глибини припалу і шорсткості) обробленої поверхні від режимів різання.

Дослідження виконувались верстаті з ЧПК 3К152ВФ20 (рис. 2), для оправок КРВ-25, шліфуваль-

ний круг – ПП 600x80x305 14А 32 СМ1 К, правлений за дугою кола відповідно до управляючої програми, змащувально-охолоджуюча рідина – ЭМПО ТУУ30426690.002-99 виробництва ЗАТ «Харківський Експериментальний Завод».



а



б

Рис. 4. Вимірювання жорсткості ТОС круглошліфувального верстата ЗК152ВФ20:
а – вид зверху; б – вид збоку

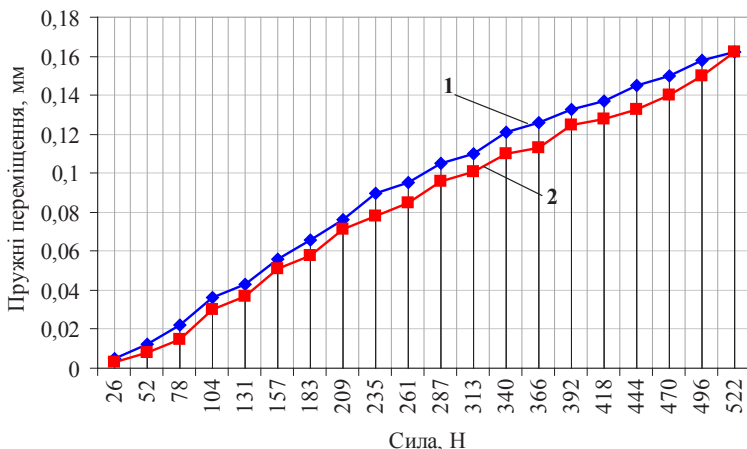


Рис. 5. Графіки залежності деформації ТОС від прикладеної сили:
1 – навантаження; 2 – розвантаження

Побудову плану експерименту було вирішено провести на основі ЛПТ рівномірно розподілених послідовностей з наступними діапазонами зміни факторів: для поперечної подачі на робочий хід $F_{\text{поп}}=0.005...0.015$ мм, для повздовжньої подачі $F_{\text{пов}}=120...800$ мм/хв. і для частоти обертання деталі $n_d=60...400$ об/хв. Вимірювання шорсткості поверхні проводилось портативним профілографом SurfTest SJ-210 виробництва фірми Mitutoyo [16].

Наступним етапом є побудова математичної моделі залежності параметрів якості (R_a, R_z) обробленої робочої поверхні оправки від режиму різання. У якості шуканих математичних моделей було прийнято лінійну модель з використанням поліному першого степеня, які матимуть вигляд:

$$R_a = a_0 + a_1 F_{\text{поп}} + a_2 n_d + a_3 F_{\text{пов}}, \quad (5)$$

$$R_z = b_0 + b_1 F_{\text{поп}} + b_2 n_d + b_3 F_{\text{пов}}, \quad (6)$$

де $a_0...a_3, b_0...b_3$ – емпіричні коефіцієнти, $F_{\text{поп}}$ – поперечна подача на робочий хід, n_d – частота обертання деталі, $F_{\text{пов}}$ – повздовжня подача шліфувального круга.

На основі експериментальних даних, використовуючи метод найменших квадратів розраховуються емпіричні коефіцієнти, які визначають рівняння регресії (5) і (6). Для цього необхідно визначити вектор оцінок S коефіцієнтів для кожного з рівнянь регресії, який вираховується формулою загального виду:

$$S = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (7)$$

де X – матриця вихідних умов, Y – матриця результатів.

Були обраховані вектори A і B оцінок коефіцієнтів для кожного з рівнянь регресії відповідно:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y_{R_a} = \begin{bmatrix} 0.143 \\ 7.2404 \\ -11.236 \cdot 10^{-4} \\ 10.029 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y_{R_z} = \begin{bmatrix} 0.714 \\ 37.1503 \\ -57.924 \cdot 10^{-4} \\ 51.136 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Таким чином остаточно рівняння регресії (5) і (6) приймають вигляд:

$$R_a = 0.143 + 7.2404 \cdot F_{\text{поп}} - 11.236 \cdot 10^{-4} \cdot n_d + 10.029 \cdot 10^{-4} \cdot F_{\text{пов}}, \quad (10)$$

$$R_z = 0.714 + 37.1503 \cdot F_{\text{поп}} - 57.924 \cdot 10^{-4} \cdot n_d + 51.136 \cdot 10^{-4} \cdot F_{\text{пов}}, \quad (11)$$

де $F_{\text{поп}}$ – поперечна подача на робочий хід, n_d – частота обертання деталі, $F_{\text{пов}}$ – повздовжня подача шліфувального круга.

Для визначення закону управління режимом різання, що забезпечуватиме необхідну шорсткість обробленої поверхні при максимально можливій продуктивності, можна безпосередньо скористатись залежностями (10) і (11). Проте, підхід, що базується на застосуванні головного комплексного показника процесу шліфування, яким є швидкість зрізування припуску (Material Removal Rate), надає можливість звести вирішувану задачу до однофакторної моделі.

Визначення залежності швидкості Q_v зрізування припуску при шліфуванні фасонної поверхні оправки необхідно проводити чисельним методом, застосовуючи моделювання геометричної взаємодії інструментальної поверхні із заготовкою за допомогою створеного програмного забезпечення, інтерфейс якої зображено на рис. 6.

Зліва знаходяться вікна для введення відповідних написам вихідних даних. Після введення вихідних даних і їх перевірки, для початку процесу моделювання потрібно натиснути кнопку «Примінити».

У верхньому вікні з'являється зображення поверхні 1 оправки з припуском 2. Після підтвердження вибору проходу (парне число – прохід вліво, непарне – вправо) і вибору положення шліфувального круга, у вікні відображається поточна поверхня оправки, інструментальна поверхня 3 і точки входу/виходу шліфувального круга 4, 5.

У нижньому правому вікні відображається схема зрізування припуску, де при шліфуванні заготовки показано два положення шліфувального круга 6, 7, які відрізняються на величину повздовжньої подачі на оберт заготовки. Товщина шару, що зрізується – заштрихована область 8 – відповідає поперечній подачі на один прохід. Точка вершини гребінця 5, висота якої визначає детерміновану складову шорсткості. У нижньому лівому вікні відображається пляма контакту шліфувального круга і поточної поверхні оправки і величина аналогу швидкості зрізування припуску, для заданого проходу і положення

шліфувального круга. Зліва знизу знаходяться функціональні кнопки.

За допомогою прикладної програми за вихідними даними (геометрія оправки) знаходиться значення швидкості $Q_{vд}$ зрізування припуску при визначених умовах досліду режимах різання. Результати моделювання занесені до табл. 1.

Наступним етапом є побудова математичної моделі залежності параметрів якості (R_a , R_z) обробленої робочої поверхні оправки станів ХПТ від швидкості зрізування припуску. У якості шуканих математичних моделей було прийнято степеневу модель, які матимуть вигляд:

$$R_a = a \cdot Q_v^\alpha, \tag{12}$$

$$R_z = b \cdot Q_v^\beta, \tag{13}$$

де a , b і α , β – емпіричні коефіцієнти і показники степеня, Q_v – швидкість зрізування припуску, $\text{мм}^3/\text{с}$.

Використовуючи підстановку і метод найменших квадратів були визначені емпіричні коефіцієнти і показники степеня для кожного з рівнянь регресії, які приймають вигляд:

$$R_a = 0.06835 \cdot Q_v^{0.5945}, \tag{14}$$

$$R_z = 0.3233 \cdot Q_v^{0.6187}. \tag{15}$$

На рис. 7 представлені схеми зрізування припуску при шліфуванні робочої поверхні оправки, де при взаємодії інструменту і заготовки 1 показані два положення шліфувального круга 2 і 3, які відрізняються на величину повздовжньої подачі $F_{пов}$ на оберт заготовки. Товщина шару припуску, що зрізується, відповідає поперечній подачі на один прохід $F_{поп}$, а поперечний перетин шару припуску, що зрізується, виділений заштрихованою областю 4 і обмежений областю ВВ'С.

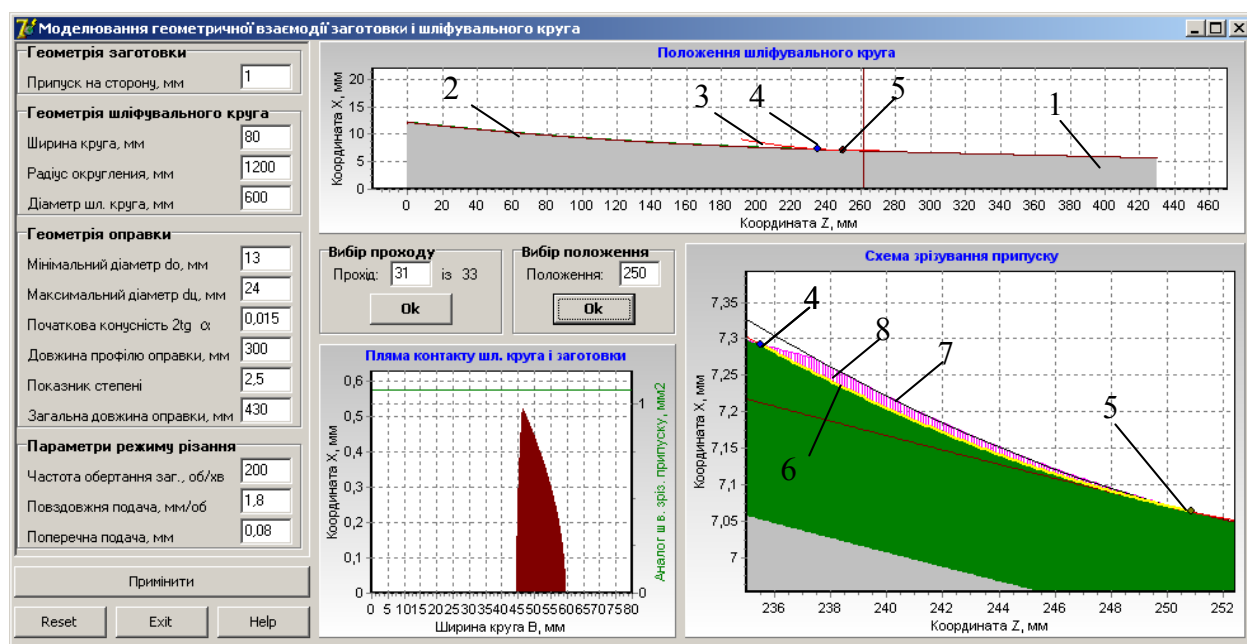


Рис. 6. Інтерфейс прикладної програми

Таблиця 1
Результати моделювання і шліфування поверхні оправки

№	Аналог швидкості зрізування припуску $Q, \text{мм}^2$	Швидкість обертання деталі $V_d, \text{мм/с}$	Швидкість зрізування припуску $Q_v, \text{мм}^3/\text{с}$	Шорсткість, мкм	
				Ra	Rz
1	0,092995	50,23	4,671484791	0,316	1,578
2	0,060969	57,96	3,533776247	0,178	0,897
3	0,059675	83,22	4,966056429	0,229	1,149
4	0,032786	104,52	3,426934356	0,125	0,629
5	0,03562	124,72	4,442666743	0,179	0,894
6	0,017163	145,60	2,49885591	0,119	0,523
7	0,019056	167,10	3,184343733	0,139	0,696
8	0,04357	187,45	8,16727144	0,454	2,273
9	0,187914	50,23	9,43961926	0,37	1,854
10	0,122759	57,96	7,115137829	0,208	1,039
11	0,120354	83,22	10,0156641	0,268	1,336
12	0,065821	104,52	6,879895267	0,148	0,742
13	0,071564	124,72	8,925744042	0,209	1,065
14	0,034397	145,60	5,008049101	0,137	0,648
15	0,038172	167,10	6,378713737	0,159	0,797
16	0,087805	187,45	16,45919827	0,531	2,658
17	0,283393	50,23	14,23588461	0,423	2,135
18	0,184875	57,96	10,71539444	0,239	1,198
19	0,181319	83,22	15,08907223	0,307	1,536
20	0,098988	104,52	10,34665339	0,169	0,847
21	0,107628	124,72	13,42378821	0,24	1,249
22	0,051679	145,60	7,524230878	0,154	0,716
23	0,057321	167,10	9,578598191	0,176	0,876
24	0,132123	187,45	24,7666836	0,608	3,045

При шліфуванні поверхні кругом (положення 2) за всією дугою контакту ВС при видаленні припуску 4 утворюється тепловий потік, який викликає підвищення температури поверхневого шару деталі, що оброблюється. Причому величина теплового потоку змінюється в залежності від інтенсивності видалення припуску (залежить від величини дуги контакту в поперечному перерізі), а температура приймає різне значення за довжиною дуги контакту. Якщо ця температура менша за критичну (зона 5', рис. 7) – фазові перетворення поверхневого шару не виникають, але якщо ця температура більша за критичну $T_{\text{крит}}$ (зона 5, рис. 7) – виникають необоротні фазові перетворення поверхневого шару – припали. Тобто за такої схеми обробки на поверхні оправки утворюється припали 6 шириною b , за якою можливо оцінити як наявність так і глибину проникнення припалу в поверхню оправки.

Аналізуючи схеми зрізування припуску рис. 7, а і б за різних режимів різання, які відрізняються тим що за схемою б було зменшено величини поперечної і поздовжньої подачі на 35% в порівнянні зі схемою а, що призвело до зменшення довжини дуги контакту в поперечному перерізі $L_{k_{\text{max}}}$ на 22%, а як наслідок і зменшення інтенсивності зрізування припуску. Чим менша інтенсивність видалення припуску тим менша температура, що виникла під час обробки і менша глибина її проникнення в тіло деталі. Тобто можливо знайти такі значення повздовжньої подачі $F_{\text{пов}}$ на оберт заготовки і поперечної подачі на один прохід $F_{\text{поп}}$, поєднання яких призведе до зменшення температури

шліфування, а як наслідок і до відсутності припалів в поверхневому шарі деталі (рис. 7, в).

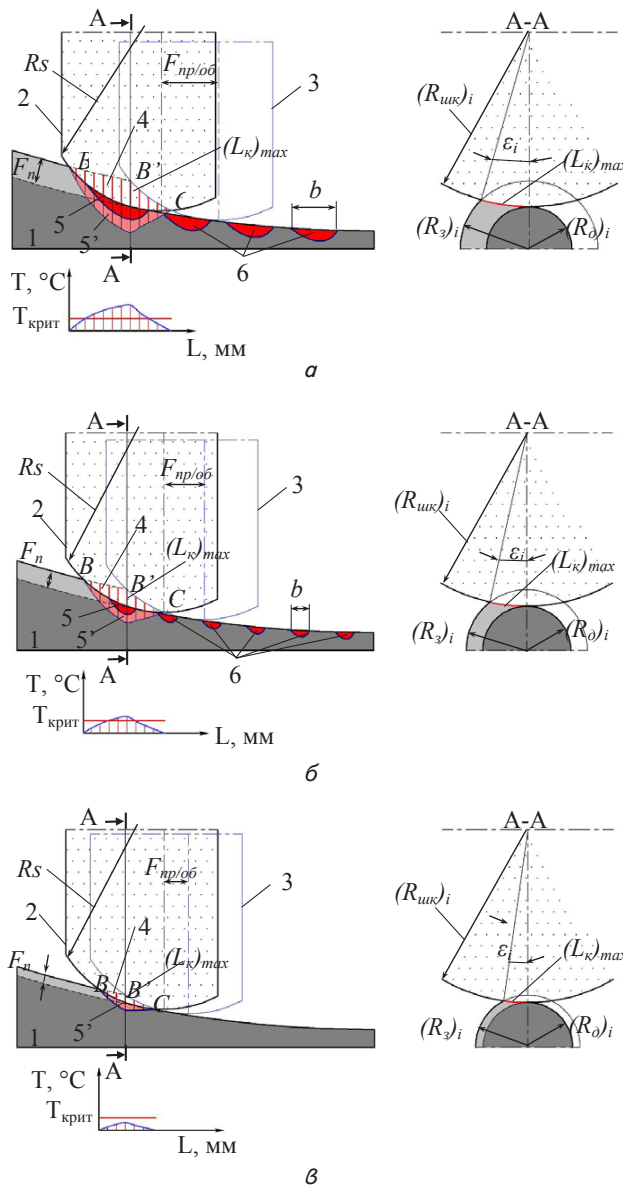


Рис. 7. Схеми зрізування припуску і утворення припалу при шліфуванні робочій поверхні оправки шліфувальним кругом у формі тора: а – $F_{\text{пов/об}}=3.5 \text{ мм/об}$, $F_n=0.015 \text{ мм}$; б – $F_{\text{пов/об}}=2.5 \text{ мм/об}$, $F_n=0.01 \text{ мм}$; в – $F_{\text{пов/об}}=1.5 \text{ мм/об}$, $F_n=0.005 \text{ мм}$

Співставлення з практичними результатами процесу шліфування опосередковано свідчить про вірність викладеного вище матеріалу. На рис. 8 представлено робочу поверхню оправки КРВ-25 (матеріал заготовки – сталь 60С2ХФА), яку було оброблено на круглошліфувальному верстаті з ЧПК ЗМ152МВФ3 ($F_{\text{пов/об}}=2.5 \text{ мм/об}$, $F_{\text{поп}}=0.01 \text{ мм}$), який був обладнаний системою ЧПК фірми Siemens, і спеціальним люнетом, який забезпечує підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи (ТОС), шліфувальним кругом – ПП 600x80x305 14А 32 СМ1 К, що правлений за дугою кола відповідно до управляючої програми, змащувально-охолоджуюча рідина –

ЭМПО ТУУ30426690.002-99 виробництва ЗАТ «Харківський Експериментальний Завод». Припали поверхні оправки (рис. 8), що утворилися в наслідок процесу шліфування, розташовані в місцях з максимальною інтенсивністю видалення припуску.

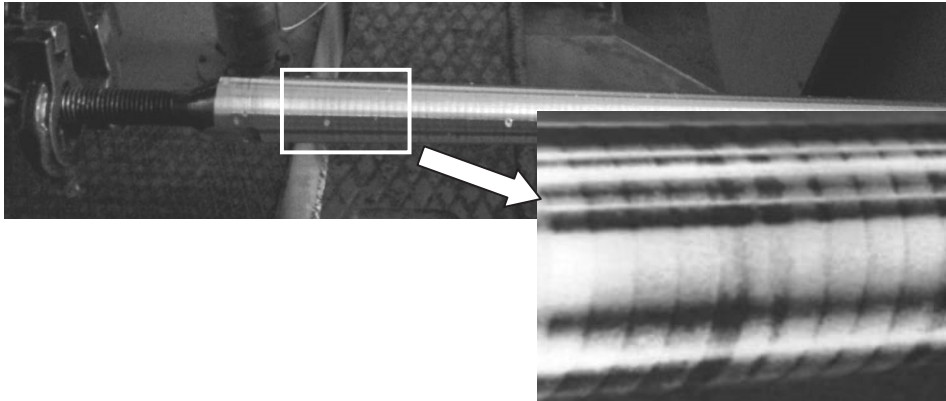


Рис. 8. Припали на поверхні оправки

Таким чином, підвищення інтенсивності видалення припуску супроводжується ростом температури в зоні шліфування і появою припалів на обробленій поверхні, які значно зменшують надійність і роботоздатність шліфованих деталей машин. Отже, для визначення глибини припалу необхідно розрахувати величину максимальної контактної температури по ширині зони контакту деталі і шліфувального круга.

Для визначення контактної температури можливо скористатися загальною формулою [17] для різних схем шліфування, яка враховує теплофізичні особливості сталей і сплавів:

$$\theta_k = 160 \cdot K_{\text{МОТС}} \left[\frac{P_z \cdot V \cdot L_k \cdot \alpha_d \cdot F_k^{-1}}{M \cdot F_n \cdot V_d + (V_d \cdot L_k)^{0.5}} \right]^{0.4}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

де $K_{\text{МОТС}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність охолодження за рахунок МОТС: $K_{\text{МОТС}} = 1.1$ – при сухому шліфуванні, $K_{\text{МОТС}} = 1.0$ – подача МОТС поливом; P_z – дотична складова сили різання, Н; V – швидкість різання, м/с; L_k – довжина дуги контакту, мм; α_d – коефіцієнт вводу теплоти в деталь з врахуванням відводу тепла в шліфувальний круг і стружку $\alpha_d = 0.7 \dots 0.8$; F_k – площа плями контакту шліфувального круга з деталлю, мм²; M – розмірний коефіцієнт, який враховує теплофізичні характеристики матеріалу деталі: для жаростійких сталей – $M = 1.9$, для легованих – $M = 3.1$; $F_{\text{ноп}}$ – поперечна подача на один прохід (глибина різання), мм; V_d – швидкість обертання деталі, мм/с.

Сила різання при шліфуванні (її дотична складова P_z) залежить від матеріалу деталі, шліфувального круга, швидкості зрізування припуску і режиму різання. Ця залежність має емпіричний вигляд:

$$P_z = C_{p_z} \cdot Q_v^\alpha, \text{ Н} \quad (17)$$

де C_{p_z} і α – коефіцієнт і показник степеня, які залежать від матеріалу заготовки і шліфувального круга, Q_v – швидкість зрізування припуску. Для нашого випадку шліфування оправки КРВ-25, матеріал заго-

товки сталь 60С2ХФА, кругом 25А ПП 600x80x100 32 СМ1: $C_{p_z} = 4$, $\alpha = 0.6$.

Визначення швидкості Q_v зрізування припуску при шліфуванні фасонної поверхні оправки необхідно проводити чисельним методом, застосовуючи моделювання геометричної взаємодії інструментальної поверхні із заготовкою за допомогою створеного програмного забезпечення [18]. Програма дозволяє визначити для кожного положення шліфувального круга пляму контакту круга з деталлю F_k і максимальну довжину дуги контакту $(L_k)_{\text{max}}$ (рис. 6).

Таким чином, спіраючись на величину максимальної контактної температури θ_k (16) і використовуючи залежність для визначення глибини розповсюдження структурних перетворень в поверхневому шарі шліфованої деталі, яке базується на рівнянні проникнення теплової хвилі [17, 19], можливо визначити глибину проникнення критичної температури, що викликає припали:

$$H_{\text{прип}} = \left(\frac{\alpha \cdot \tau \cdot 10^6}{\pi} \right)^{0.5} \cdot \ln \left(\frac{\theta_k}{\theta_{\text{прип}}} \right) \text{ мм}, \quad (18)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності: $\alpha = 1.8 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_k^{0.5}$, м²/с; τ – час розповсюдження температури або час контакту кожної точки поверхні деталі з кругом: $\tau = 16.7 \cdot L_k / V_d$, с, $\theta_{\text{прип}}$ – мінімальна температура, з якої розпочинаються структурні перетворення, $\theta_{\text{прип}} = 500$ °С.

Глибина проникнення критичної температури $H_{\text{прип}}$ одночасно і є величиною критичного припуску N_k , який необхідно буде зрізати на наступних проходах і при якій необхідно перемикати управління (рис. 3).

Приведені вище математичні залежності і моделі дозволяють визначити обмеження граничного алгоритму (рис. 3). Максимально допустима швидкість зрізування припуску (3) при допустимій деформації ТОС $\delta_{\text{доп}} = 0.004$ мм:

$$Q_{v_{\text{max}}} = \left(\frac{0.4 \cdot 2995 \cdot 0.004}{0.78} \right)^{\frac{1}{0.6}} = 20.6 \text{ мм}^3/\text{с}, \quad (19)$$

а швидкість зрізування припуску (14), яка забезпечить необхідну шорсткість поверхневого шару деталі (R_a 0.16 мкм):

$$Q_{v_d} = \left(\frac{R_a}{0.06835} \right)^{\frac{1}{0.5945}} = \left(\frac{0.16}{0.06835} \right)^{\frac{1}{0.5945}} = 4.2 \text{ мм}^3/\text{с}. \quad (20)$$

Тоді дотична складова сили різання (17), що виникне при шліфуванні з максимально допустимою швидкістю зрізування припуску (19):

$$P_z = 4 \cdot 20.6^{0.6} = 26, \text{ Н.} \tag{21}$$

Використовуючи програмне забезпечення (рис. 6), було проведено моделювання шліфування оправки КРВ-25: $V = 30 \text{ м/с}$, $F_n = 0.025 \text{ мм}$; $V_d = 200 \text{ мм/с}$, і отримано наступні данні: $L_k = 0.35 \text{ мм}$, $F_k = 0.261 \text{ мм}^2$. Тоді максимальна контактна температура (16), що може виникнути при шліфуванні:

$$\theta_k = 160 \cdot \left[\frac{26 \cdot 30 \cdot 0.35 \cdot 0.8 \cdot 0.261^{-1}}{1.9 \cdot 0.025 \cdot 200 + (200 \cdot 0.35)^{0.5}} \right]^{0.4} = 756 \text{ }^\circ\text{C.} \tag{22}$$

За цією величиною максимальної контактної температури можна визначити глибину (18) проникнення критичної температури в поверхню оправки:

$$H_{\text{прин}} = \left(\frac{4.95 \cdot 10^{-6} \cdot 0.195 \cdot 10^6}{3.14} \right)^{0.5} \cdot \ln \left(\frac{756}{500} \right) = 0.23 \text{ мм.} \tag{23}$$

Таким чином, граничний алгоритм (рис. 3) для шліфування оправки КРВ-25 формується максимально допустимою швидкістю зрізування припуску $Q_{v_{\text{max}}} = 20.6 \text{ мм}^3/\text{с}$, при допустимій деформації ТОС $\delta_{\text{доп}} = 0.004 \text{ мм}$, на етапі шліфування до критичної величини припуску, що залишився $H_k = 0.23 \text{ мм}$ (лінія 1), з наступним зниженням швидкості зрізування припуску по лінії 2 (лінія припалу) до швидкості зрізування припуску $Q_{v_d} = 4.2 \text{ мм}^3/\text{с}$, яка забезпечить необхідну якість (відсутність припалів) та шорсткість поверхневого шару деталі ($Ra \text{ } 0.16 \text{ мкм}$).

Розроблена методика використовується для автоматичного проектування управлінн режимом різання у створеній САМ-системі проектування управляючих програм для шліфування оправок станів ХПТ на шліфувальному верстаті з ЧПК.

На інтерфейсі (рис. 9), який показує розраховане управління для шліфування оправки КРВ-25, лінією 1 представлений граничний алгоритм, лінією 2 – спроектований закон управлінн поперечною подачею, а

лінією 3 – передбачувана зміна швидкості зрізування припуску з урахуванням жорсткості ТОС. Зліва на інтерфейсі знаходяться вікна для введення вихідних даних, які представляють собою результати проведених експериментів по визначенню жорсткості технологічної обробляючої системи і показників якості обробленої поверхні оправки від режимів різання.

Створений при моделюванні файл містить всю необхідну інформацію для проектування управляючої програми безпосередньо у G-кодах, яка сприймається стійкою ЧПК верстату.

Розроблена САМ-система використовується для автоматизованого проектування управляючих програм при шліфуванні оправок станів ХПТ на модернізованому шліфуальному верстаті з ЧПК ЗМ152МВФ2 і впроваджена у виробництво на ПАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн» (м. Нікополь, Україна).

4. Висновки

В результаті проведених досліджень встановлені необхідні зв'язки між граничним алгоритмом зрізування припуску і процесом шліфування складної поверхні оправки КРВ-25 стану ХПТ, на базі чого розроблена методика визначення режиму різання, що забезпечує виконання умов за якістю обробленої поверхні і мінімальний час операції.

На основі проведених експериментальних досліджень по визначенню жорсткості ТОС було визначено максимально допустиму швидкість зрізування припуску при максимально допустимій деформації ТОС 0.004 мм , яка складає $20.6 \text{ мм}^3/\text{с}$.

В результаті проведених експериментальних досліджень було визначено математичну модель залежності параметрів якості обробленої робочої поверхні оправки станів ХПТ від швидкості зрізування припуску, на основі якої визначено швидкість зрізування припуску в кінці циклу – $4.2 \text{ мм}^3/\text{с}$, яка забезпечить необхідну шорсткість $Ra \text{ } 0.16 \text{ мкм}$ і відсутність припалів обробленої поверхні.

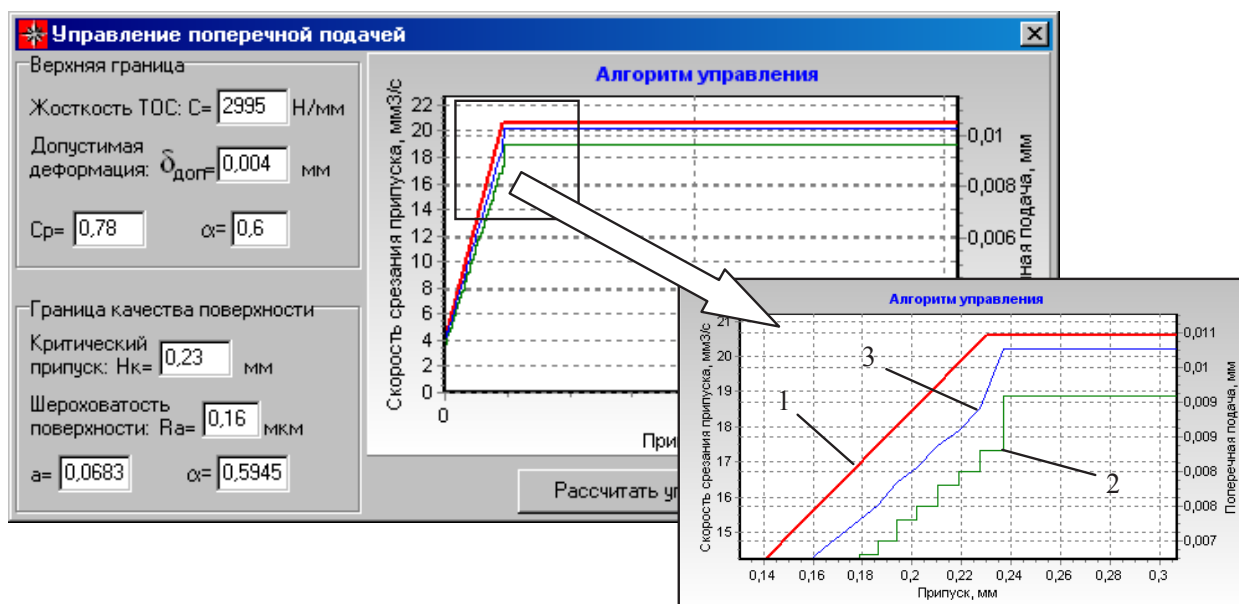


Рис. 9. Интерфейс САМ-системы

На основі розробленого програмного засобу для визначення зв'язку швидкості зрізування припуску при шліфуванні робочої поверхні оправки (плями контакту) з граничним алгоритмом управління було розраховано величину критичного припуску граничного алгоритму управління режимом різання, яка склала 0.23 мм.

Таким чином доведено, що визначення обмежень граничного алгоритму управління доцільно виконувати за результатами оброблення даних експериментів, що виконуються за розробленою методикою.

Розроблено модуль САМ системи автоматизованого програмування для шліфувального верстата

з ЧПК, що створює проміжний файл для постпроцесора верстата, в якому міститься вся необхідна інформація для управління режимом різання і яка закладена безпосередньо в G-кодах управляючої програми. САМ система впроваджена у виробництво на Нікопольському трубному заводі ПАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн», де пройшла промислову експлуатацію і було підтверджено її ефективність при підготовці управляючих програм для шліфування широкої номенклатури оправок з криволінійною утворюючою на модернізованому шліфувальному верстаті з ЧПК 3М152МВФ2.

Література

1. Strehlau, O. Introducing cold pilger mill technology [Text] / O. Strehla. – The Tube and Pipe Journal, 2006.
2. Stapleton, G. Cold Pilger Technology [Текст] / G. Stapleton. – Fma Store, 2011.
3. Патент України № 74812, МПК: B24B 41/00 (2012.01). Люнет для шліфування нежорстких фасонних деталей круглого перерізу [Текст] / Петраков Ю. В., Чамата С. М. – 12.11.2012, бюл. № 21/12.11.2012, заяв. u201205265, 27.04.2012.
4. Incremental test leads firms HEIDENHAIN [Electronic resource] / HEIDENHAIN. – Available at: www.heidenhain.de
5. HEIDENHAIN LENGTH GAUGES [Text] / Catalog, 2013.
6. Петраков, Ю. В. Вимірювання точності шліфування нежорстких деталей з криволінійною утворюючою [Текст] / Ю. В. Петраков, К. М. Паньків, С. М. Чамата // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 2, № 7 (62). – С. 22–25. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/12380/10268>
7. Петраков, Ю. В. Проектування управляючих програм для шліфування оправок станів холодної прокатки труб на верстаті з ЧПК [Текст] / Ю. В. Петраков, С. М. Чамата // Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування. – 2013. – Вип. 69. – С. 51–56.
8. Левин, А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков [Текст] / А. И. Левин. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
9. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения [Текст] / В. С. Корсаков. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.
10. Russell, F. H. Some applications of state and parameters estimation to machine tool problems [Text] / F. H. Russell // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1992. – Vol. 92, Issue 3. – P. 633–646.
11. Балакшин, Б. С. Адаптивное управление станками [Текст] / Б. С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
12. Старков, В. К. Дислокационные представления о резании металлов [Текст] / В. К. Старков // М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
13. Петраков, Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням [Текст] / Ю. В. Петраков. – УкрНДІАТ, Київ, 2004. – 384 с.
14. Михелькевич, В. Н. Автоматическое управление шлифованием [Текст] / В. Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
15. Петраков, Ю. В. Загальні принципи управління шліфуванням [Текст] / Ю. В. Петраков // Вестник НТУУ «КПІ», Машиностроение. – 2005. – № 46. – С. 55–60.
16. Portable Surface Roughness Tester SURFTTEST SJ-210 Series [Electronic resource] / Mitutoyo America Corporation. – Available at: www.mitutoyo.com
17. Калинин, Е. П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента [Текст] / Е. П. Калинин. – Санкт-Петербург «Политехника», 2009. – 357 с.
18. Петраков, Ю. В. Управление шлифованием оправок станов холодной прокатки труб [Текст] / Ю. В. Петраков, С. М. Чамата // Вісник СевНТУ Машиноприладобудування та транспорт. – 2014. – Вип. 151. – С. 127–133.
19. Подосенова, Н. А. Тепловые явления при шлифовании закаленной стали [Текст]: сб. науч. тр. / Н. А. Подосенова // Качество поверхностей деталей машин. – М.: А. Н. СССР, 1959. – С. 41–45.