

СТЕПАНОВ М. С., ЛІТОВЧЕНКО П. І., ІВАНОВА М. С., ХОДАКОВ Л. В., ГАСАНОВ М. І., РУДНЄВ О. В.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИХОДЖУВАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ В РІЗНОМАНІТНИХ УМОВАХ

Процес виходжування при круглому шліфуванні забезпечує мінімізацію залишкових напружень в обробленому матеріалі та поліпшення якості поверхні, особливо при обробці матеріалів з високою твердістю, оскільки знижується ймовірність появи мікротріщин та покращується шорсткість і мікроструктура поверхні. При цьому ефективність процесу виходжування залежить від різних факторів: режиму різання, розмірів заготовки, тривалості процесу, ріжучої здатності круга, швидкості знімання матеріалу та ін. В статті наведено результати численних експериментальних досліджень запропоновано математичні залежності для розрахунку сталої часу шліфування та кількості ходів стола, що дозволяє закінчувати обробку заготовок зі строго визначеною швидкістю знімання матеріалу, забезпечує мінімальне розсіювання точності розмірів партії деталей, що обробляються. На основі експериментальних досліджень виконано оцінювання адекватності отриманих залежностей реальному процесу шліфування, при якому встановлено високу збіжність розрахункових і експериментальних величин. Відхилення миттєвих значень досліджуваних параметрів від середнього значення не перевищувало 10%. Наводяться також результати експериментальних досліджень по визначенню впливу часу виходжування на досягну шорсткість поверхні шліфованої деталі при торцециліндровому шліфуванні. Встановлено, що при збільшенні часу шліфування спостерігається зниження шорсткості, причому цей характер змінення шорсткості є справедливим для всіх досліджуваних швидкостей шліфувального круга. Визначено точний момент часу закінчення процесу виходжування, що сприяє отриманню оптимальної якості обробленої поверхні. Отримані розрахункові залежності рекомендуються для використання при проєктуванні автоматизованих систем механічної обробки деталей шліфуванням.

Ключові слова: виходжування, стала часу, кількість ходів стола, час виходжування, сила різання, режим різання, швидкість шліфувального круга, швидкість знімання матеріалу.

STEPANOV M., LITOVCHENKO P., IVANOVA M., KHODAKOV L., HASANOV M., RUDNEV A.

GRINDING EFFICIENCY IN VARIOUS CONDITIONS

The process of nursing during cylindrical grinding ensures the minimization of residual stresses in the processed material and the improvement of the surface quality, especially when processing materials with high hardness, since the probability of microcracks is reduced and the roughness and microstructure of the surface are improved. At the same time, the effectiveness of the nursing process depends on various factors: cutting mode, workpiece dimensions, process duration, cutting ability of the circle, material removal rate, etc. The article presents the results of numerous experimental studies and proposes mathematical dependencies for calculating the grinding time constant and the number of table passes during nursing during cylindrical external and internal and face grinding, which allows finishing the processing of workpieces with a strictly defined material removal rate, provides minimal dispersion of the accuracy of the dimensions of the batch of parts being processed. Based on experimental studies, an assessment of the adequacy of the obtained dependencies to the real grinding process was performed, in which a high convergence of the calculated and experimental values was established. The deviation of the instantaneous values of the studied parameters from the average value neither for the grinding time constant nor for the table stroke number did not exceed 10%. The results of experimental studies on determining the influence of the cooling time on the achievable surface roughness of the ground part are also presented. It was established that with an increase in the grinding time, a decrease in roughness is observed, and this nature of the change in roughness is valid for all the studied grinding wheel speeds. The exact moment of the end of the cooling process was determined, which contributes to obtaining the optimal quality of the processed surface. The obtained calculated dependencies are recommended for use in the design of automated systems for mechanical processing of parts by grinding.

Keywords: cooling, time constant, number of table strokes, cooling time, cutting force, cutting mode, grinding wheel speed, material removal rate.

1. Вступ. Традиційний цикл обробки на круглошліфувальних верстатах складається з: форсованої подачі до торкання круга із заготовкою; шліфування з попередньою подачею (чорнове шліфування); шліфування з остаточною подачею (чистове шліфування); виходжування. Основна частина припуску видаляється із заготовки під час використання попередньої і остаточної подач. Однак при вимиканні остаточної подачі шліфувального круга в період виходжування також здійснюється знімання матеріалу деталі внаслідок пружних деформацій технологічної системи.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Ускладнення обробки з монотонним пониженням подачі (швидкості знімання матеріалу) здійснюється з метою підвищення продуктивності обробки з врахуванням обмежень у вигляді забезпечення отриманої точності деталей [1].

В роботі [2] констатується, що оптимальним є цикл шліфування, який включає тільки етап виходжування, а більш близьким до оптимального варіанту є одноступінчастий цикл з експоненціальною зміною у часі величини подачі.

Процес виходжування при шліфуванні досліджено достатньо ґрунтовно.

Встановлено, що при розробці автоматизованих циклів шліфування важливо знати характер зміни пружних переміщень в технологічній системі з течею часу обробки. Обробка заготовки без подачі на останньому ході виходжування дозволяє суттєво знизити величину пружних переміщень, тим самим забезпечити завдану точність обробленої деталі.

Раніше було отримано формулу, що описує змінення радіуса заготовки за період виходжування:

$$\Delta R = \int_{S_k}^{S_{ok}} \frac{\pi d_s B_{ш}}{k_p j_{\Sigma}} \Delta V = \frac{\pi d_s B_{ш}}{k_p j_{\Sigma}} (S_{ок} - S_k),$$

де d_3 – діаметр заготовки, що шліфується; k_p – коефіцієнт ріжучої здатності шліфувального круга; $B_{ш}$ – ширина шліфування; J_{Σ} – сумарна жорсткість технологічної системи; S_k і $S_{ок}$ – швидкість знімання матеріалу на початку і в кінці виходжування, відповідно.

Також отримано формулу для визначення часу виходжування [3]:

$$\tau_{вих} = \frac{1}{J_{\Sigma} k_{pl}} \ln \frac{t_{M2}}{t_{M3}}$$

де k_{pl} – лінійний коефіцієнт різання, що визначається за залежністю: $k_{pl} = \frac{k_p}{\pi d_3 B_{ш}}$; t_{M2} і t_{M3} – робоча подача і подача виходжування, відповідно.

На теперішній час теоретично визначені умови зменшення величини пружного переміщення і основного часу обробки [4].

Ефективність виходжування можна оцінити поправочними коефіцієнтами, які вводяться в базові моделі багатовимірної дисперсного аналізу з постійними факторами, пошук яких виконано без виходжування. При чому найбільш значимо виходжування може відобразитися на зменшенні висотного параметра шорсткості та збільшенні відносної опорної довжини профіля [5].

Разом з тим, недостатньо інформації по точному визначенню кількості ходів виходжування (наприклад, при повздовжньому круглому шліфуванні). Також відсутній порівняльний аналіз особливостей виходжування при використанні різних схем шліфування, котре виконується з різними швидкостями різання.

Практично не досліджена степінь впливу затуплення круга на процеси виходжування. Мало досліджено вплив швидкості різання, що передує виходжуванню і подачі на параметри процесу шліфування і якість обробленої поверхні.

3. Мета дослідження. Теоретичне і експериментальне дослідження впливу параметрів режиму різання на ефективність виходжування при різних схемах круглого шліфування та визначення залежностей для розрахунку головних параметрів виходжування – сталої часу шліфування та потрібної кількості ходів стола.

4. Викладення основного матеріалу.

Кругле зовнішнє повздовжнє шліфування.

Відомо [6] що якість поверхонь, оброблених шліфуванням, визначається кінцевою швидкістю знімання металу із заготовки. З метою підвищення продуктивності важливо знати момент часу, коли швидкість знімання металу буде дорівнювати заданій і, отже, при умові отримання потрібного розміру, можна давати команду на закінчення циклу шліфування. Завдяки цьому, буде зменшено час остаточного етапу шліфування, а отже, буде досягнуто мінімальний час обробки в цілому.

Одним із найважливіших параметрів процесу шліфування є стала часу, оскільки являє собою сумарну оцінку двох основних величин – коефіцієнта ріжучої здатності круга і приведеної до зони різання жорсткості технологічної системи.

Коефіцієнт пропорційності між пружними деформаціями технологічної системи і швидкістю знімання металу (або силою різання) характеризує ефективність процесу шліфування і називається сталою часу процесу.

Відомо [7], що при круглому зовнішньому шліфуванні при вимиканні подачі під час виходжування, швидкість знімання матеріалу (сила різання) змінюється за експоненціальним законом. Тому, для визначення сталої часу можна скористатися наступною властивістю експоненти.

Для етапу виходжування (при зчитуванні показників з датчика сили) можна записати:

$$P_i \cdot e^{\frac{\Delta t}{T_n}} = P_{i+1}, \quad (1)$$

$$P_i \cdot e^{\frac{\Delta t}{T_n}} = P_{i+2}. \quad (2)$$

Поділивши рівняння (1) на рівняння (2) та прологарифмувавши обидві частини, отримуємо:

$$\frac{\Delta t}{T_n} = \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}. \quad (3)$$

З рівняння (3) визначаємо сталу часу:

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}}, \quad (4)$$

де T_n – стала часу шліфування; Δt – проміжок часу, через який проводиться вимірювання сили різання; P_{i+1} , P_{i+2} – величини виміряної через проміжок часу Δt сили різання.

При повздовжньому шліфуванні під час одного ходу стола силу різання можна вважати незмінною ($P = \text{const}$). При виходжуванні сила різання зменшується дискретно від ходу до ходу стола, залишаючись при цьому протягом одного ходу стола малозмінною, тобто, практично постійною. Для визначення сталої часу виходжування вимірювання сили різання проводили під час кожного ходу стола.

Час одного ходу стола визначали за залежністю

$$\Delta t = \frac{B_3}{S_{cm}}, \tag{5}$$

де B_3 – довжина частини заготовки, яка шліфується; S_{cm} – швидкість повздовжнього переміщення стола.

З врахуванням викладеного вище, формула (4) набуває наступного вигляду

$$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}}. \tag{6}$$

При повздовжньому шліфуванні змінення сили різання на етапі виходжування здійснюється через проміжки часу, що дорівнюють часу одного ходу стола відповідно до формули (5).

Змінення сили різання при виходжуванні можна представити у вигляді (рис. 4,а). Якщо видалити прямолінійні ділянки, що відповідають силі різання за період одного ходу стола, та з'єднати початкові точки цих ділянок, можна отримати експоненту, що показана на рис.1,б.

З врахуванням виразу (3), для цієї експоненти можна записати

$$\frac{t}{T_n} = \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}, \tag{7}$$

де P_{\max} – значення сили різання в момент початку виходжування; P_{\min} – значення сили різання при якому закінчується процес обробки; t – час, протягом якого сила різання змінюється від максимального до мінімального значення.

Із виразу (7) можна визначити час t

$$t = T_n \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}. \tag{8}$$

Якщо відомий час одного ходу стола (див. формулу (5)), можна визначити кількість ходів стола, після здійснення яких установиться необхідне значення сили різання.

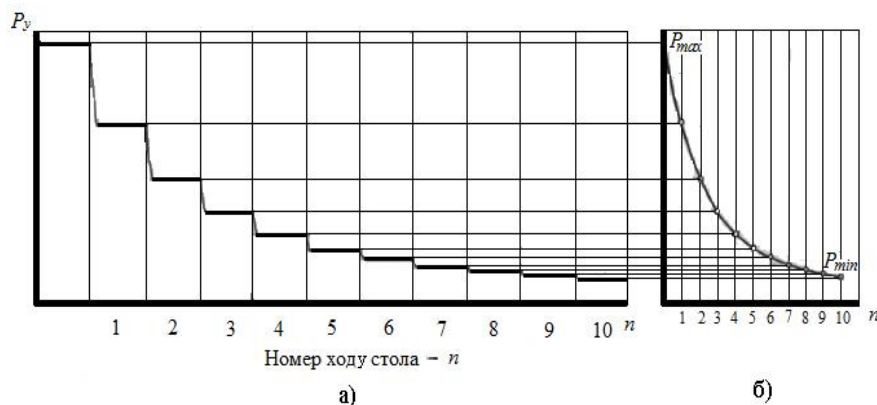


Рис. 1 – Графік змінення сили різання при виходжуванні

$$n = \frac{t}{\Delta t} = \frac{T_n \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}}}{\Delta t}. \tag{9}$$

Підставивши значення Δt із формули (5) у формулу (9), отримаємо остаточний вид виразу для розрахунку

кількості ходів виходжування

$$n = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (10)$$

Перевірку коректності отриманих залежностей проводили у два етапи. На першому етапі за експериментальними даними визначали сталу часу T_n . На другому етапі, з врахуванням значення T_n , розраховували кількість ходів виходжування, що потрібні для встановлення заданої сили різання і виконували контрольне шліфування. Під час першого контрольного шліфування деталь обробляли методом повздовжніх проходів, по закінченні чого здійснювали декілька ходів стола без подачі на глибину. Під час виходжування здійснювали вимірювання сили різання на кожному ході стола. Після аналізу отриманої інформації (наприклад, обробки осцилограми) по отриманим кожним двом значенням сили різання по формулі (6) визначали сталу часу шліфування. Потім, за декількома значеннями T_n визначали його середнє значення, яке використовували для подальшого розрахунку кількості ходів виходжування.

Після цього, проводили повторне шліфування заготовки із фіксацією змінення значень сили різання при виходжуванні. Із осцилограми вибирали значення сили різання на i -тому, наприклад, 5-тому ході стола при виходжуванні і підставляли його у формулу (10). З цієї формули визначали розрахунковий номер хода стола при виходжуванні і порівнювали його з фактичним номером хода, під час якого брали значення сили різання P_i . По відповідності фактичної розрахункової величини кількості ходів n можна робити висновок про достовірність отриманих залежностей і можливості їх використання в алгоритмах управління процесами повздовжнього шліфування. Експерименти проводили при шліфуванні заготовки зі сталі Р6М5 діаметром $D_3 = 90$ мм и довжиною $B_3 = 490$ мм абразивним кругом 24A25НСМ27К6. Використовували наступні режими шліфування:

- швидкість шліфувального круга – 50м/с;
- швидкість повздовжнього переміщення стола $S_{cm} = 3000$ мм/хв;
- глибина різання – 0.01 мм;
- кількість ходів виходжування – 10;
- припуск, що знімався за час шліфування – 0,2 мм.

Обробку проводили на верстаті 3М162И.

Результати вимірювання сили різання на кожному ході стола при виходжуванні і розрахункові значення сталої часу шліфування наведені в табл. 1.

В табл. 2 наведено результати розрахункового визначення номера ходу виходжування в момент встановлення заданої сили різання. Результати отримано при контрольному шліфуванні і вимірюванні сили різання.

Аналіз результатів наведених у табл. 1 і 2 показує, що формули (6) і (10) можуть бути використані для визначення сталої часу і кількості ходів виходжування при повздовжньому зовнішньому шліфуванні.

Таким чином, якщо відома стала часу повздовжнього шліфування і величина радіальної сили різання на останньому перед виходжуванням проході, можна розрахувати номер ходу стола, при якому встановлюється задана величина сили різання (швидкість знімання матеріалу). Це дозволить закінчувати обробку заготовок зі суворо визначеною швидкістю знімання матеріалу, що забезпечує мінімальне розсіювання точності розмірів (діаметра) у всій партії деталей, що обробляються.

Табл. 1 – Результати вимірювання сили різання при виходжуванні

№ ходу	P_{yi} , Н	$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{P_{i+1}}{P_{i+2}}}$, с	$T_{нсер}$, с
0	405,0	-	32,63
1	301,0	33,0	
2	221,0	31,68	
3	161,0	30,90	
4	117,0	30,66	
5	86,2	32,04	
6	64,5	33,78	
7	48,3	34,20	
8	36,1	33,66	
9	26,6	362,10	
10	20,0	34,32	

Внутрішнє шліфування.

Вимірювання сили різання при внутрішньому шліфуванні викликає певні труднощі, оскільки заготовка при обробці закріплюється в патроні і використання традиційних методів тензометрії (наприклад, за допомогою тензометричних центрів) не представляється можливим.

Установка (наклейка) датчиків безпосередньо на вузли верстату (патрон, консоль шпинделя), що контактують з оброблюваною заготовкою, також неможлива внаслідок їх обертання з великою частотою. З цієї причини виміри складових сил різання були замінені на виміри ефективних потужностей шліфування.

Потужність шліфування визначали за допомогою ватметра, який був підключений в ланцюг живлення приводу обертання шліфувальної головки.

Аналітично ефективну потужність можна визначити за формулою:

$$N_{ef} = N_n - N_{xx} ,$$

де N_n і N_{xx} – споживана потужність і потужність холостого ходу, відповідно.

Табл. 2 – Результати розрахунку номера ходу стола при виходжуванні в момент, коли завдана величина сили різання приймає стале значення

№ ходу	P_{yi} , Н	$n = \frac{S_{cm} T_{ncер}}{B_3} \ln \frac{P_{max}}{P_{max}}$	$\left \frac{n_{\phi} - n_{розрах}}{n_{\phi}} \right \cdot 100, \%$
0	484,0	-	-
11	345,1	1,12	12
12	264,1	2,02	1
13	201,3	2,92	2,6
14	152,7	3,84	1,5
15	110,1	4,93	1,4
16	79,8	6,00	0
17	56,2	7,17	2,4
18	45,1	7,90	1,25
19	31,9	9,05	0,5
20	24,8	9,89	1,1

Приймаючи до уваги залежності (4), (5) і (6), сталу часу та кількість ходів виходжування визначаємо за формулами:

$$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{N_{i+1}}{N_{i+2}}} ; \tag{11}$$

$$n = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{N_{max}}{M_{min}} , \tag{12}$$

де N_{i+1} , N_{i+2} – величини вимірюваної потужності через проміжок часу Δt ; N_{max} , N_{min} – значення ефективної потужності шліфування в момент початку і кінця виходжування, відповідно.

Результати розрахунку T_n для 20 ходів стола наведено в табл. 3. Аналіз результатів розрахунку показує, що при внутрішньому поздовжньому шліфуванні відхилення величини T_n від номінального не перевищує 10%.

Табл. 3 – Результати виміру і ефективної потужності і розрахунків сталої часу при внутрішньому шліфуванні

Номер ходу стола	N_{ef} , Вт	$T_n = \frac{B_3}{S_{cm} \ln \frac{N_{i+1}}{N_{i+2}}}$, с	$T_{ncер}$, с	$\left \frac{T_n - T_{ncер}}{T_{ncер}} \right \cdot 100 \%$, %
0	310	107,1	111,8	4,2
1	295	102,1		8,6
2	282	113,8		1,8
3	271	119,4		6,8
4	260	114,5		2,4
5	249	120,7		7,9
6	239	105,0		6,1
7	228	123,0		10,0

8	219	105,9		5,3
9	209	112,4		0,5
10	200	121,2		8,4
11	192	116,3		4,0
12	184	111,3		0,5
13	176	106,4		4,8
14	168	101,4		9,3
15	160	110,6		1,1
16	153	105,6		5,5
17	146	117,9		5,4
18	140	113,0		1,1
19	134	108,0		3,4
20	128	-		-

Для перевірки адекватності отриманих залежності (12) реальним умовам обробки шліфували заготовку із сталі ХВГ на наступних режимах:

- швидкість переміщення стола – 2 мм/хв;
- глибина різання – 0,001 мм;
- частота обертання заготовки – 150 об/хв.

В період виходжування фіксували значення потужності, що споживається приводом внутрішньошліфувальної головки на i -тому (наприклад 5-му) ході стола. З цієї величини потужності вираховували значення потужності холостого хода і отримане значення N_{ef} підставляли у формулу (13)

$$n_{розрах} = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{N_{efmax}}{N_{efi}} \quad (13)$$

За формулою (13) визначали розрахунковий номер ходу стола при виходжуванні і порівнювали його з фактичним номером ходу, при якому вимірювали значення потужності. По відповідності фактичної і розрахункової величини ходу $n_{розрах}$ проводили оцінку достовірності отриманої залежності. Аналіз результатів цих розрахунків, наведений у табл. 4, говорить про добру збіжність розрахункових і експериментальних величин номера ходу стола.

Табл. 4 – Результати виміру ефективної потужності шліфування, фактичний і розрахунковий номер ходу стола, погіршність розрахунку номера ходу стола при внутрішньому повздовжньому шліфуванні

Фактичний номер ходу стола	N_i , Вт	$n_{розрах} = \frac{S_{cm} T_n}{B_3} \ln \frac{N_{efmax}}{N_{efi}}$	$\left \frac{n_{ф} - n_{розрах}}{n_{ф}} \right \cdot 100, \%$
0	328	-	-
1	313	1,057	5,7
2	298	2,166	8,4
3	284	3,25	8,3
4	270	4,39	9,7
5	267	4,64	7,2
6	250	6,13	2,1
7	235	7,53	7,5
8	224	8,61	7,6
9	215	9,53	5,9
10	204	10,72	7,2
20	141	19,10	4,5
30	85	30,49	1,6
40	58	39,13	2,1
50	33	51,80	3,6

Торцекругле (суміщене) шліфування.

У ході експерименту визначали вплив часу виходжування на шорсткість обробленої поверхні (торцевої і циліндричної). Шліфування проводили на торцекруглошліфувальному полуавтоматі моделі 3Т161Е зі

швидкостями різання 35, 50 і 60 м/с. Використовували шліфувальний круг 24A40HCM26K5. В якості МОР використовували водний розчин (склад 5% емульсола + 0,2% кальцинованої соди + 0,5% NaNO_2), яку подавали у зону різання поливом з витратою 50 $\text{дм}^3/\text{хв}$.

Параметри режиму різання, що використовувалися, наведено у табл. 5.

Табл. 5 – Параметри режиму різання і правки круга при торцекруглому шліфуванні.

Параметри режиму різання і правки		Швидкість шліфувального круга, м/с		
		35	50	60
Швидкість заготовки, V_z , м/хв		33		50
Частота обертання заготовки, n_z , об/хв		260		390
Врізна подача, V , мм/хв	попередня, $V_{\text{ноп}}$	1,0	1,5	2,5
	остаточна $V_{\text{ост}}$	0,1		0,15
Припуск, Z , мм	загальний $Z_{\text{заг}}$	0,5		
	попередній, $Z_{\text{ноп}}$	0,45		
	остаточний, $Z_{\text{ост}}$	0,05		
Швидкість правки, $V_{\text{пр}}$, мм/об		0,1	0,15	0,25
Глибина правки, $l_{\text{пр}}$, мм		0,03		

Залежність шорсткості шліфованої поверхні від тривалості виходжування говорить про покращення шорсткості зі збільшенням часу виходжування (рис. 2, 3).

Аналіз графіків на рис. 2, 3 показує, що значне зниження шорсткості спостерігається у перші 4 секунди виходжування, надалі (6-12 сек) зниження шорсткості уповільнюється, причому цей характер змінення шорсткості є справедливим для всіх досліджуваних швидкостей шліфувального круга.

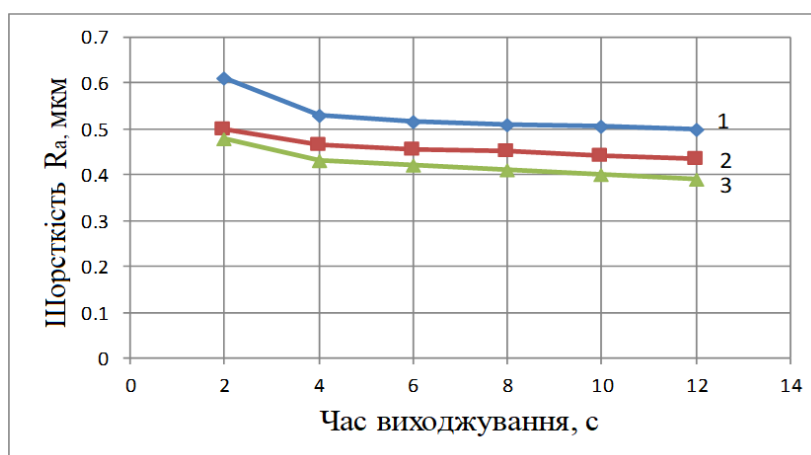


Рис. 2 – Вплив часу виходжування і швидкості шліфувального круга на шорсткість R_a циліндричної поверхні при торцекруглому шліфуванні: 1, 2, 3 – швидкості круга, відповідно, $V_k=35, 50$ і 60 м/с

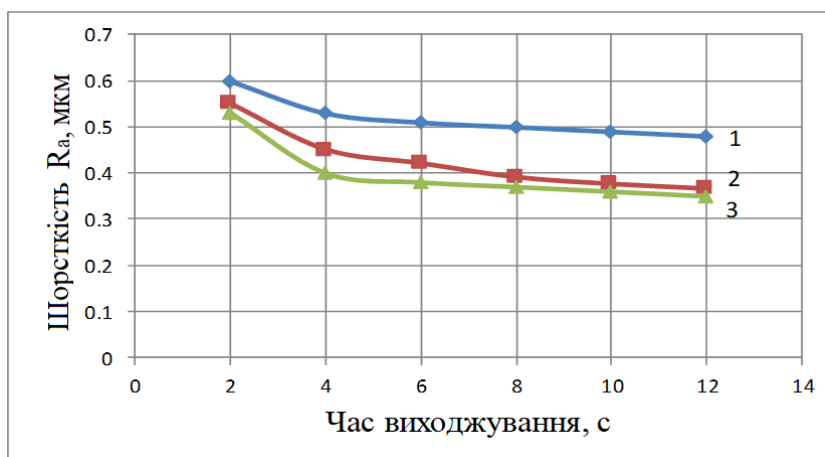


Рис. 3 – Вплив часу виходжування і швидкості шліфувального круга на шорсткість R_a торцевої поверхні при торцекруглому шліфуванні: 1, 2, 3 – швидкості круга, відповідно, $V_k=35, 50$ і 60 м/с

торцевкруглому шліфуванні: 1, 2, 3 – швидкості круга, відповідно, $V_k= 35, 50$ і 60 м/с.

Висновки.

1. Отримано залежності для розрахунку сталої часу шліфування та кількості ходів стола при виходжуванні при круглому зовнішньому і внутрішньому шліфуванні. Встановлено, якщо відома стала часу поздовжнього шліфування і величина радіальної сили різання на останньому перед виходжуванням проході, можна розрахувати номер ходу стола, при якому встановлюється завдана величина сили різання (швидкість знімання матеріалу). Це дозволяє закінчувати обробку заготовок зі строго визначеною швидкістю знімання матеріалу, що забезпечує мінімальне розсіювання точності розмірів у всій партії деталей, що обробляються.

2. Для оцінки адекватності отриманих залежностей реальному процесу круглого зовнішнього і внутрішнього шліфування проведено експериментальне дослідження. Аналіз результатів показав добру збіжність розрахункових і експериментальних величин номера ходу стола. Відхилення миттєвих значень від середнього ані по сталій часу шліфування, ані по номеру ходу столу не перевищував 10%.

3. Проведено експериментальні дослідження по встановленню впливу часу виходжування при торцевкруглому шліфуванні на досягну шорсткість шліфованої деталі. Встановлено, що при збільшенні часу шліфування спостерігається зниження шорсткості, причому цей характер змінення шорсткості є справедливим для всіх досліджуваних швидкостей шліфувального круга.

4. Встановлено точний момент часу закінчення процесу обробки, що має важливе значення для отримання оптимальної якості обробленої поверхні. Отримані розрахункові залежності для визначення сталої часу шліфування і кількості ходів стола при виходжуванні рекомендуються для використання при проєктуванні автоматизованих систем механічної обробки деталей шліфуванням.

Список літератури:

1. Tönshoff H.K., Peters J., Inasaki I., Paul T. Modelling and Simulation of Grinding Processes // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1992. – Vol. 41, Issue 2. – Pp. 677-688. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5).
2. Alves J. A. C., Fernandes U. de B.; Diniz A. E., Bianchi, E. C., de Aguiar P. R., Canarim R. C. Analysis of the Influence of Sparkout Time on Grinding Using Several Lubrication/Cooling Methods // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009. – Vol. 31 (№ 1). – Pp. 47-51.
3. Chiu N., Malkin S. Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1993. – Vol. 42, Issue 1, Pp. 383-387. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62467-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62467-6).
4. Новіков Ф. В. Оптиміальні рішення в технологіях механічної обробки [Електронний ресурс] : монографія / Ф. В. Новіков. – Дніпро : ЛІРА, 2024. – 360 с.
5. Kim, J., Lee, Y. A study on the spark-out in precision grinding by simulation. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1994. – Vol. 17 (3), – Pp. – 347-356. <https://doi.org/10.1080/02533839.1994.9677598>.
6. Lee Yo-J., Kim J-Du. A study of characteristics of grinding by spark-out // The Korean Society of Automotive Engineers, 1993. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 120-125.
7. Hashimoto, F. The Design of an Infeed Cylindrical Grinding Cycle // Inventions, 2020 – Vol. 5 (№ 46), – Pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/inventions5030046>.

References (transliterated)

1. Tönshoff H.K., Peters J., Inasaki I., Paul T. Modelling and Simulation of Grinding Processes // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1992. – Vol. 41, Issue 2. – Pp. 677-688. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5).
2. Alves J. A. C., Fernandes U. de B.; Diniz A. E., Bianchi, E. C., de Aguiar P. R., Canarim R. C. Analysis of the Influence of Sparkout Time on Grinding Using Several Lubrication/Cooling Methods // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009. – Vol. 31 (№ 1). – Pp. 47-51.
3. Chiu N., Malkin S. Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding // CIRP Annals Manufacturing Technology, 1993. – Vol. 42, Issue 1, Pp. 383-387. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62467-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62467-6).
4. Novikov F. V. Optymalni rishennia v tekhnolohiiakh mekhanichnoi obrobky [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / F. V. Novikov. – Dnipro : LIRA, 2024. – 360 p.
5. Kim, J., Lee, Y. A study on the spark-out in precision grinding by simulation. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1994. – Vol. 17 (3), – Pp. – 347-356. <https://doi.org/10.1080/02533839.1994.9677598>.
6. Lee Yo-J., Kim J-Du. A study of characteristics of grinding by spark-out // The Korean Society of Automotive Engineers, 1993. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 120-125.
7. Hashimoto, F. The Design of an Infeed Cylindrical Grinding Cycle // Inventions, 2020 – Vol. 5 (№ 46), – Pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/inventions5030046>.

Надійшла (received) 26.07.2025

Степанов Михайло Сергійович (Mykhailo Stepanov) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: +38 (057) 707-66-25. e-mail: mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua.

Літовченко Петро Іванович (Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, тел. +38 (057) 707-61-43, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: +38 (057) 707-66-25; e-mail: maryna.ivanova@khp.edu.ua.

Ходаков Леонід Володимирович (Khodakov Leonid) – завідувач лабораторією шліфування експериментального відділу дослідно-конструкторського бюро шліфувальних верстатів Харківського верстатобудівного виробничого об'єднання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0752-7150>; e-mail: khodakovleonid@gmail.com.

Гасанов Магомедсін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin) – доктор технічних наук, професор, кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2161-2386>; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com.

Руднєв Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-6748> тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: aleksandr1827.64@gmail.com.