

Новіков Ф. В. (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна)

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ ТА УМОВ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ

Анотація. Наведено розроблений теоретичний підхід щодо роздільного урахування часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, що є важливим для обґрунтування умов суттєвого підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки. Даний теоретичний підхід також дозволяє більш глибоко підходити до аналізу фізичних закономірностей процесу шліфування та встановленню його технологічних можливостей.

Abstract. A developed theoretical approach is presented for separately accounting for the fractions of the tangential component of the cutting force, caused by the processes of "clean cutting" and friction of the grinding wheel with the processed material in the overall energy balance of the grinding process, which is important for substantiating the conditions for a significant increase in productivity and parameters of accuracy and quality of processing. This theoretical approach also allows for a more in-depth approach to the analysis of the physical regularities of the grinding process and the establishment of its technological capabilities.

Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами. Процеси обробки матеріалів шліфуванням знайшли широке застосування у машинобудівному виробництві завдяки можливості досягнення високих показників точності та якості оброблених поверхонь виробів. Однак їх суттєвим недоліком є висока енергоємність порівняно із процесами обробки матеріалів ріжучими лезовими інструментами. Це приводить до високої силової і теплової напруженості процесу шліфування, виникненню значних сил і температур різання та зменшенню продуктивності обробки. Застосування прогресивних методів правлення шліфувальних кругів дозволяє в ряді випадків досягти суттєвого зменшення енергоємності обробки. Однак вона все ж залишається на достатньо високому рівні, що обмежує ефективність застосування процесів шліфування.

Основним чинником, що приводить до зниження технологічних можливостей шліфування, є інтенсивне тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в зоні різання. Воно стає значним, коли процес шліфування здійснюється в режимі затуплення шліфувального круга. У цьому випадку має місце не тільки тертя зношених абразивних зерен круга, а ще й тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом, що приводить до значного зростання енергоємності обробки, особливо, під час застосування алмазних кругів на металевих зв'язках. Тому питання суттєвого зменшення

енергоємності процесу шліфування шляхом зменшення сили тертя під час шліфування є традиційно важливим і актуальним в технології машинобудування з погляду можливостей зменшення силової і теплової напруженості процесу шліфування, підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] наведено основні підходи до вирішення питань зменшення енергоємності процесу шліфування. Показано ефективність їх практичного застосування. Однак вони базуються лише на експериментальних дослідженнях сили різання та потужності шліфування, за якими потім визначається енергоємність обробки [3, 4]. Це не дозволяє в повній мірі розкрити закономірності формування високої енергоємності обробки під час шліфування. Тому для вирішення цих питань необхідно проведення теоретичних досліджень в цьому напрямі, оскільки закономірності формування енергоємності, особливо під час шліфування, надто складні і не можуть бути вирішені лише на основі проведення експериментальних досліджень.

Формулювання невирішених частин загальної проблеми. Основними, до кінця не вирішеними питаннями щодо формування енергоємності обробки під час шліфування, слід розглядати питання роздільного урахування часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. Як показує практика, це занадто складна задача, яку і до теперішнього часу не вирішено в теорії шліфування. Тому дану роботу й присвячено розв'язанню цієї задачі, яка має важливе теоретичне й практичне значення.

Цілі статті та постановка задачі. Метою роботи є встановлення науково обґрунтованих теоретичних рішень щодо можливостей визначення енергоємності обробки під час шліфування на основі роздільного урахування часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, що є важливим для суттєвого підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки.

Задачі дослідження:

- 1) розроблення математичної моделі роздільного визначення часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом;
- 2) експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень;
- 3) встановлення характеру впливу сили «чистого різання» і сили тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом на продуктивність обробки та параметри силової напруженості процесу шліфування. Обґрунтування на цій основі умов підвищення ефективності процесу шліфування.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботі для виконання поставлених задач дослідження наведено новий теоретичний підхід до

визначення тангенціальної складової сили «чистого різання» на основі відомої аналітичної залежності [5]:

$$P_{z.piz} = \sigma \cdot S_{сум}, \quad (1)$$

де σ – умовне напруження різання (енергоємність обробки), Н/м²; $S_{сум}$ – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами шліфувального круга, м²; $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – продуктивність обробки, м³/с; $V_{дет}$ – швидкість деталі, м/с; B – ширина шліфування, м; t – фактична глибина шліфування, м.

Величина $S_{сум}$ визначається наступним чином. За час обробки τ відбувається знімання оброблюваного матеріалу об'ємом \mathcal{G} , який можна представити у вигляді стрічки довжиною l та площею поперечного перерізу $S_{сум} = B \cdot a_z$, де a_z – умовна товщина стрічки, м. Тоді $\mathcal{G} = S_{сум} \cdot l$, звідки можна визначити величину $S_{сум} = \mathcal{G} / l$. Із урахуванням залежностей $l = V_{кр} \cdot \tau$ (де $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с) і $\mathcal{G} = Q \cdot \tau$, маємо:

$$S_{сум} = \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (2)$$

Як видно, величина $S_{сум}$ визначається відношенням продуктивності обробки Q до швидкості круга $V_{кр}$.

Для умов шліфування величина σ визначається відомою залежністю [5, 6]:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{ст}}{K_{ш.piz}}, \quad (3)$$

де $\sigma_{ст}$ – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м²; $K_{ш.piz} = P_{z.piz} / P_{y.piz}$ – коефіцієнт абразивного різання («чистого різання»); $P_{y.piz}$ – радіальна складова сили «чистого різання».

Після підстановки залежності (3) у залежність (1), маємо:

$$P_{z.piz} = \sqrt{2 \cdot \sigma_{ст} \cdot S_{сум} \cdot P_{y.piz}}. \quad (4)$$

У результаті встановлено аналітичну залежність для визначення величини $P_{z.piz}$. Як видно, вона нелінійно пов'язана із величинами $S_{сум}$ та $P_{y.piz}$: чим вони більше, тим більше величина $P_{z.piz}$.

При цьому коефіцієнт абразивного різання («чистого різання») $K_{ш.piz} = P_{z.piz} / P_{y.piz}$ визначається залежністю:

$$K_{ш.piz} = \frac{P_{z.piz}}{P_{y.piz}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{ст} \cdot S_{сум}}{P_{y.piz}}}. \quad (5)$$

Із залежності (5) випливає, що чим більше величина $P_{y.piz}$ і менше величина $S_{сум}$, тим менше $K_{ш.piz} = P_{z.piz} / P_{y.piz}$, що відповідає відомим практичним даним. Отже, підвищити $K_{ш.piz} = P_{z.piz} / P_{y.piz}$ та, відповідно,

ріжучу здатність шліфувального круга можна або збільшенням величини $S_{\text{сум}}$, або зменшенням величина $P_{y.piz}$, яка негативно впливає на ефективність процесу шліфування [7].

Для кількісного визначення величини $P_{z.piz}$ розглянемо процес плоского шліфування за пружною схемою (радіальна складова сили різання $P_y = 60$ Н) абразивним кругом 24А40М36К5 плоских зразків із сталі Р18 ($\sigma_{\text{ст}} = 3600$ Н/м²). Умови шліфування: $V_{кр} = 26$ м/с; швидкість деталі – $V_{\text{дет}} = 6$ м/хв; ширина шліфування – $B = 10$ мм.

В процесі шліфування експериментально встановлено значення фактичної глибини шліфування t та потужності шліфування N в залежності від часу обробки τ (табл. 1). За цими експериментально встановленими значеннями t і N розраховано значення тангенціальної складової сили різання $P_z = N / V_{кр}$, коефіцієнта абразивного різання (коефіцієнта шліфування) $K_{ш} = P_z / P_y$, продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$ та умовного напруження різання $\sigma = N / Q$ (табл. 1).

Слід зазначити, що умовне напруження різання $\sigma = P_{z.piz} / S_{\text{сум}} = P_{z.piz} / V_{кр} / Q = N / Q$ і енергоємність обробки $\sigma = N / Q$ – це одна і та ж фізична величина, оскільки визначається (після нескладних математичних перетворень) однією залежністю. Розмірності в умовного напруження різання і енергоємності обробки теж однакові: в умовного напруження різання – Н/м², а в енергоємності обробки (після перетворень) – Дж/м³ = Н·м/м³ = Н/м².

Таблиця 1 – Вплив часу обробки на параметри шліфування за пружною схемою плоских зразків із сталі Р18 ($V_{кр} = 26$ м/с; $V_{\text{дет}} = 6$ м/хв; $B = 10$ мм; $P_y = 60$ Н)

Номер експерименту	Час обробки τ , хв	Фактична глибина шліфування t за 5 проходжень, мм	Продуктивність обробки Q , мм ³ /хв	Потужність шліфування N , Вт	Тангенціальна складова сили різання P_z , Н	Коефіцієнт шліфування $K_{ш}$	Умовне напруження різання $\sigma \cdot 10^3$, Н/мм ²
1	0,1	0,037	2220	840	28,8	0,480	22,7
2	0,5	0,013	780	854	22,4	0,373	65,7
3	1,0	0,008	480	630	21,5	0,358	78,7
4	2,0	0,006	360	522	17,9	0,299	87,0
5	3,0	0,005	300	480	16,4	0,273	96,0
6	5,0	0,003	180	450	15,2	0,253	150,0

У результаті виявлено (табл. 1), що за 5 хвилин обробки фактична глибина шліфування t зменшилася з 0,037 мм до 0,003 мм, тобто у 12,3 рази. Відповідно, у стільки ж разів зменшилася і продуктивність

обробки Q , що пов'язано із затупленням шліфувального круга. Однак при цьому потужність шліфування N , тангенціальна складова сили різання P_z та коефіцієнт шліфування $K_{ш} = P_z / P_y$ зменшилися незначно – менше, ніж у 2 рази. Отже, користуючись лише наведеними експериментальними даними, складно визначити зміни внутрішніх параметрів обробки, які привели до суттєвої зміни продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$. Тому слід скористатися залежністю (4) для встановлення чинників, що привели до зменшення продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$ в 12,3 рази зі збільшенням часу обробки.

Для цього у табл. 2 (за умови $P_{y.pіз} = P_y = 60$ Н) наведено розрахункові значення величин $P_{z.pіз}$, $K_{ш.pіз} = P_{z.pіз} / P_y$, $\sigma_{pіз} = P_{z.pіз} / S_{сум}$, сили тертя $P_{z.тp} = P_z - P_{z.pіз}$ та коефіцієнта тертя $f = P_{z.тp} / P_y$. Як видно, сила тертя $P_{z.тp}$ шліфувального круга із оброблюваним матеріалом дорівнює різниці тангенціальної складової сили різання P_z і тангенціальної складової сили «чистого різання» $P_{z.pіз}$.

Таблиця 2 – Розрахункові значення параметрів силового напруження процесу шліфування $P_{z.pіз}$, $K_{ш.pіз} = P_{z.pіз} / P_y$, $\sigma_{pіз} = P_{z.pіз} / S_{сум}$,

$$P_{z.тp} = P_z - P_{z.pіз}, f = P_{z.тp} / P_y$$

Номер експерименту	Час обробки τ , хв	$P_{z.pіз}$, Н	$K_{ш.pіз}$	$\sigma_{pіз} \cdot 10^3$, Н/мм ²	$P_{z.тp}$, Н	Коефіцієнт тертя f
1	0,1	24,8	0,413	17,4	4,0	0,067
2	0,5	14,7	0,245	29,4	7,7	0,128
3	1,0	11,57	0,193	37,32	9,93	0,165
4	2,0	9,97	0,166	43,34	7,93	0,132
5	3,0	9,11	0,151	47,44	7,29	0,12,5
6	5,0	7,0	0,117	59,82	8,2	0,136

Виходячи із розрахункових даних, наведених в табл. 2, величина $P_{z.pіз}$ зменшується із часом обробки значно інтенсивніше, ніж величина P_z . При цьому величина $P_{z.тp}$ за 5 хвилин обробки стає більше величини $P_{z.pіз}$. Це вказує на те, що зменшення продуктивності у 12,3 разів за 5 хвилин обробки обумовлено, як процесом затуплення шліфувального круга (оскільки відбулося зменшення складової сили різання $P_{z.pіз}$), так і збільшенням сили тертя $P_{z.тp}$ шліфувального круга з оброблюваним матеріалом в зоні різання. При цьому коефіцієнт шліфування («чистого різання») $K_{ш.pіз}$ значно інтенсивніше зменшується із часом обробки порівняно із загальним коефіцієнтом шліфування $K_{ш}$. Це також вказує на значну роль затуплення шліфувального круга у зменшенні продуктивності обробки Q .

Таким чином, встановлено, що роздільне визначення сили «чистого різання» та сили тертя в зоні різання дозволяє більш об'єктивно оцінити зміни параметрів силової напруженості процесу шліфування та на їх основі встановити дійсні причини суттєвого зменшення продуктивності обробки. Також отримане теоретичне рішення дозволяє більш глибоко підходити до аналізу фізичних закономірностей процесу шліфування та встановлення його технологічних можливостей, оскільки, користуючись лише експериментальними даними, складно визначити зміни внутрішніх параметрів обробки, які приводять до суттєвої зміни продуктивності обробки.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В роботі розроблено математичну модель встановлення тангенціальної складової сили різання у вигляді суми двох складових, які визначають силу «чистого різання» і силу тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом в зоні різання. Це відкриває нові можливості аналізу процесу шліфування з погляду підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки. Тому перспективами подальших досліджень є застосування отриманих теоретичних рішень щодо обґрунтування експериментальних даних та аналізу досліджуваних параметрів шліфування, розробленню практичних рекомендацій із підвищення ефективності процесів шліфування.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. *Технологія машино- та приладобудування: підручник / О. В. Якимов, В. І. Марчук, П. А. Лінчевський, О. О. Якимов, В. П. Ларшин. Луцьк: ЛДТУ, 2005. 710 с.*
2. *Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.*
3. *Полянський В. І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2021. 41 с.*
4. *Лавріненко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков / Під заг. ред. академіка НАНУ М. В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.*
5. *Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. 412 с. URL: <http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/10068>*
6. *Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія / Ф. В. Новіков. Дніпро: ЛІРА, 2024. 460 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/34842>*
7. *Новіков Ф. В. Концепції розвитку технологічних рішень професора Якимова Олександра Васильовича : монографія / Ф. В. Новіков, В. Б. Наддачин. Дніпро : ЛІРА, 2025. 468 с. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/36901>*