

УДК 621.93.026.001.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У АБРАЗИВНОМУ АРМОВАНОМУ КРУЗІ ПРИ РІЗАННІ МЕТАЛОПРОКАТУ

Юрій Абрашкевич¹, Григорій Мачишин², Олена Човнюк³

Київський національний університет будівництва і архітектури
03680, Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна
e-mail: ¹abrashkevich.iud@knuba.edu.ua, ²machyshyn.gm@knuba.edu.ua, ³e23@ukr.net

STUDY OF THERMAL PROCESSES IN ABRASIVE ARMOVE CRUISES AT THE CUTTING OF METAL PROCESSES

Yuri Abrashkevych, Grygory Machyshyn, Elena Chovnyuk

Kyiv National University of Construction and Architecture
03680, Povitroflotskyi prosp., 31, Kyiv, Ukraine,
e-mail: ¹abrashkevich.iud@knuba.edu.ua, ²machyshyn.gm@knuba.edu.ua, ³e23@ukr.net

АНОТАЦІЯ. У роботі викладені результати експериментальних досліджень з визначення температури в зоні контакту і зв'язці абразивного армованого круга при різанні металопрокату.

Ключові слова: абразивний армований круг, металопрокат, зона контакту, теплопровідність, зносостійкість.

АННОТАЦИЯ. В работе изложены результаты экспериментальных исследований по определению температур в зоне контакта и связке абразивного армированного круга при резании металлопроката.

Ключевые слова: абразивный армированный круг, металлопрокат, зона контакта, теплопроводность, износостойкость.

ABSTRACT. Purpose. Definition of mathematical dependencies that will allow to determine the temperature in the contact area of the abrasive reinforced circle with a metal surface and a circle bundle. **Methodology/approach.** Studies were conducted in laboratory conditions with the subsequent development of a mathematical model. **Findings.** The result of the study is to determine the temperature in the cutting zone, as well as in the abrasive wheel. **Research limitations/implications.** Dependences are obtained, which allow to determine the temperature in the contact zone and the connection of the circle, and the ways are devised for creating abrasive reinforced circles of special purpose with increased operational parameters. **Originality/value.** The results of the work can be used both in the educational process and on production sites.

Key words: Abrasive reinforced circle, metal rolling, contact zone, thermal conductivity, wear resistance.

ВСТУП

Механічне різання металопрокату на виробничих базах і монтажних площадках виконується різцевими труборізами, дисковими та стрічковими пилами. Труборізи з різцевими інструментами різних типорозмірів застосовують для різання труб діаметром до 510 мм та знаття фасок. Вони мають порівняно невисоку продуктивність внаслідок недостатньої жорсткості конструкції та неможливості використовувати охолоджуючу рідину. Різцевими труборізами неможливо обробляти тонкостінні труби, тому що при їх закріпленні відбувається деформація стінок труби. Різцевий інструмент труборізів потребує кваліфікованого

заточування, що в монтажних умовах майже неможливо [1].

Машини з ножівковими полотнами для роботи в стаціонарних умовах малопродуктивні та мають низькі енергетичні показники із-за витрат на тертя при зворотному холостому ході, термін служби ножівкових полотен малий. Крім того, вони мають відносно великі габарити та масу.

Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду показує, що з механічних способів різання найбільш продуктивним є абразивний. Перевага цього виду різання особливо очевидна в міру збільшення легованих добавок в матеріалі, який розрізають. Загальні витрати на різання високолегованих сталей дисковими пилами в 4,5 рази більше, ніж

при абразивному різанні. Абразивне різання кругом діаметром 500 мм – найбільш продуктивний та економічний спосіб для вуглецевих, легованих і високолегованих сталей, а також труб діаметром до 159 мм.

Різання абразивними армованими кругами забезпечує велику продуктивність, чистоту поверхні, незмінність структури металу, не потребує додаткової обробки і має суттєві переваги порівняно з вогневим та іншими механічними способами.

Різання ручними машинами доцільно використовувати тільки у тому випадку, коли металопрокат чи трубу неможливо або недоцільно встановлювати на маятникову пилу.

Різання труб і металопрокату на виробничих базах та монтажних площадках виконується за допомогою маятникових пил, робочим органом в яких є абразивні армовані круги діаметром 300, 400 та 500 мм [2 – 4].

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи – визначення температур, що виникають в процесі різання в контактній зоні та зв'язці абразивного круга, що дозволить підвищити ефективність його використання і створювати круги спеціального призначення, зокрема для різання легованих сталей, кольорових металів і каменя.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Склад і конструкція абразивного армованого круга, його зносостійкість, режими роботи [5, 6] значною мірою визначаються тепловими процесами, що відбуваються при різанні.

У роботі розглядаються питання, пов'язані з визначенням температур, що виникають в зоні контакту та у зв'язці круга при різанні вуглецевих і легованих сталей. Дослідження виконувалися при різанні труб 57x4 мм, 76x4 мм, 89x4 мм (сталь 10); 57x4 мм, 76x4 мм, 108x10 мм (сталь ХІ8НІ0Т), прутка діаметром 20...40 мм (сталь 3) абра-

зивними армованими кругами Д400x4x32 мм на експериментальному стенді [7].

Експериментальний стенд дозволяє працювати на частотах обертання шпинделя 82...4180 об/хв з фіксованими подачами 0,025...1,25 м/хв. Для виміру контактних температур застосовувався метод напівштучної термопари. Як елементи термопари використовувалися труба, що розрізається, або пруток, а також дріт із хромелю діаметром 0,12 мм. Ізольований дріт з хромелю монтується в отворі, просвердленому в прутку або трубі. При різанні на трубі та дроті утворюються задирки, які зварюються та утворюють термопару.

Температура в зв'язці круга вимірювалася за допомогою хромель-алюмінієвої термопари, яка прикріплювалася до армувальної склосітки, розташованій всередині круга та встановлювалася на різних відстанях від різальної кромки. Після установки круга на стенді вільні кінці термопар приєднувалися до ртутного струмоз'ємника, встановленого на шпинделі стенда.

Реєстрація температур здійснювалася за допомогою шлейфового осцилографа. Тарування термопар виконувалась шляхом їх порівняння з показами еталонної термопари. Робочі швидкості при проведенні експериментів складали 50...80 м/с, а швидкості подачі – 0,1...1,0 м/хв.

Результати експериментів наведені на рис. 1 і рис. 2. Встановлено, що збільшення швидкостей подачі при робочій швидкості 80 м/с від 0,1 м/хв до 1,0 м/хв приводить до зниження контактної температури з 1390°К до 1220°К при різанні вуглецевої сталі та з 1590°К до 1370°К при різанні легованої сталі.

Зменшення контактних температур зі збільшенням подачі пояснюється інтенсифікацією процесу самозаточування круга внаслідок збільшення навантажень, діючих на абразивні зерна, тобто різання здійснюється гострішими зернами. При зменшенні подачі процес самозаточування відбувається менш інтенсивно і різання виконується менш гострими зернами, що призводить до росту контактних температур.

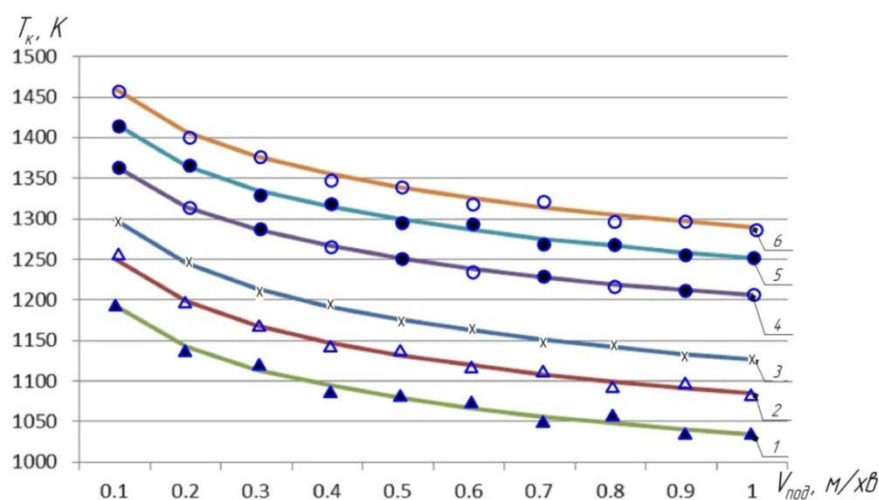


Рис. 1. Залежність зміни температури в зоні різання (T_K) від швидкостей подачі (V_{nod}) при постійній робочій швидкості ($V_P=const$): 1 - $V_P=50$ м/с, сталь 10; 2 - $V_P=65$ м/с, сталь 10; 3 - $V_P=80$ м/с, сталь 10; 4 - $V_P=50$ м/с, X18P10T; 5 - $V_P=65$ м/с, X18P10T; 6 - $V_P=80$ м/с, X18P10T

Fig. 1. Dependence of temperature change in the cutting zone (T_K) on the feed speeds at (V_{nod}) a constant operating speed ($V_P=const$): 1 - $V_P=50$ m/s, Steel 10; 2 - $V_P=65$ m/s, Steel 10; 3 - $V_P=80$ m/s, Steel 10; 4 - $V_P=50$ m/s, X18P10T; 5 - $V_P=65$ m/s, X18P10T; 6 - $V_P=80$ m/s, X18P10T

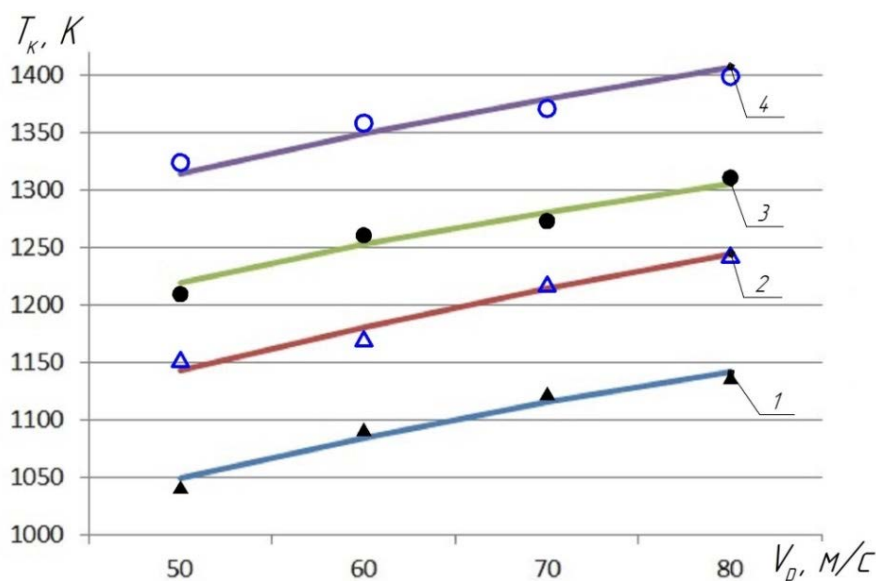


Рис. 2. Залежність зміни температури в зоні різання (T_K) від робочої швидкості (V_P) при постійній швидкості подачі ($V_{nod}=const$): 1 - $V_{nod}=0,8$ м/хв, сталь 10; 2 - $V_{nod}=0,2$ м/хв, сталь 10; 3 - $V_{nod}=0,8$ м/хв, X18P10T; 4 - $V_{nod}=0,2$ м/хв, X18P10T

Fig. 2. Dependence of temperature change in the cutting zone (T_K) on the working speed (V_P) at a constant feed rate ($V_{nod}=const$): 1 - $V_{nod}=0,8$ m/min, Steel 10; 2 - $V_{nod}=0,2$ m/min, Steel 10; 3 - $V_{nod}=0,8$ m/min, X18P10T; 4 - $V_{nod}=0,2$ m/min, X18P10T

Для визначення впливу температур на чистоту поверхні різку виконувалося різання труб з вуглецевої сталі в широкому діапазоні швидкостей подачі від 0,025 до 1,25 м/хв при робочій швидкості 86...87 м/с. Встановлено, що якість повер-

хні зрізу труб, отримана при різанні на швидкостях подачі 0,025...0,1 м/хв, незадовільна внаслідок інтенсивного утворення задирок і перегріву металу. Перед зварюванням ці труби необхідно піддавати додатковій обробці. Низька якість поверхні зрі-

зу пояснюється високим контактними температурами, що виникають при різанні на вказаних режимах. Зі збільшенням швидкостей подач від 0,2 до 1,25 м/хв, тобто при зменшенні часу контакту між кругом і трубою, що розрізається, чистота поверхні зрізу покращується, що пояснюється зменшенням впливу контактних температур на подачах нижче 0,2 м/хв.

Встановлено, що при різанні труб з вуглецевих і легованих сталей однакових перерізів на ідентичних режимах контактні температури при різанні легованих сталей приблизно на 470°K вище, ніж у вуглецевих, що пояснюється більш високою в'язкістю легової сталі в порівнянні з вуглецевою, тобто при різанні легової сталі більша кількість тепла переходить в зв'язку круга. Крім того, інтенсивніший нагрів зв'язки круга відбувається із-за нижчої теплопровідності легової сталі в порівнянні з вуглецевою. Впливом вказаних теплових процесів слід пояснити нижчу зносостійкість кругів при різанні легованих сталей в порівнянні з вуглецевими.

Зносостійкість кругів при різанні труби 57x4 мм з легової сталі Х18Н10Т приблизно в 1,6...2,2 разів нижче, ніж при різанні аналогічної труби зі сталі 10. У зв'язку з цим доцільно розробляти спеціальні круги для різання легованих сталей. Одним з напрямів може бути збільшення зернистості абразивного зерна в крузі, що в деякій мірі знижує небажаний вплив температури на зв'язку круга. Цим пояснюється, що зносостійкість кругів із зернистістю електрокорунда 80 приблизно на 20...25% вище, ніж у кругів із зернистістю електрокорунда 50. При цьому слід зазначити, що круги завтовшки до 3 мм включно не можуть виготовлятися з електрокорунда зернистістю

80 внаслідок різкого погіршення їх міцнісних характеристик. Іншим напрямом по створенню кругів спеціального призначення є модифікація зв'язок, включаючи заміну існуючого зв'язуючого, або введення до складу круга активних наповнювачів, що дозволяють поліпшити теплофізичні та міцнісні характеристики інструменту.

Із рис. 2 видно, що зі збільшенням робочої швидкості при постійних швидкостях подач температура в зоні контакту підвищується, що пояснюється збільшенням числа теплових імпульсів. В той же час зменшуються зусилля різання. Очевидно, температура в зоні контакту залежить одночасно від обох чинників, тому при збільшенні робочої швидкості у 1,6 рази температура збільшується в середньому на 10%.

Встановлено, що зі збільшенням довжини дуги контакту температури підвищуються.

Отримані експериментальні дані можуть бути в загальному вигляді представлені залежністю

$$T_K = C \cdot V_{\text{под}}^x \cdot V_P^y \cdot H^z, \quad (1)$$

де T_K - температура в зоні різання, °K;

C – коефіцієнт, що враховує склад, конструкцію та марку матеріалу, що розрізається; $V_{\text{под}}$ – швидкість подачі, м/хв; V_P – робоча швидкість круга, м/с; H – глибина різання, м.

Для визначення залежності (1) застосовувався метод багатofакторного планування експерименту. В результаті обробки експериментальних даних були визначені значення коефіцієнтів C , x , y , z та зроблена оцінка адекватності моделі за критерієм Фішера. У таблиці представлені результати розрахунків.

Таблиця. Результати розрахунків

Table. Results of calculations

Матеріал, що розрізається	Значення коефіцієнтів				$T_K = C \cdot V_{\text{под}}^x \cdot V_P^y \cdot H^z$
	C	x	y	z	
Вуглецева сталь	665	-0,062	0,182	0,056	$T_K = 665 \cdot V_{\text{под}}^{-0,062} \cdot V_P^{0,182} \cdot H^{0,056}$
Легована сталь	944	-0,054	0,144	0,066	$T_K = 944 \cdot V_{\text{под}}^{-0,054} \cdot V_P^{0,144} \cdot H^{0,066}$

З метою визначення розподілу контактних температур в зоні різання в досліджуваному зразку на різних відстанях від його периферії закріплювалися та послідовно перерізувалися термомпари. Встановлено, що температура розподіляється по дузі контакту круга і виробу, що розрізається, рівномірно.

Для створення та вдосконалення абразивних інструментів значний інтерес представляють температури, що виникають в зв'язці круга, а також їх розподіл по радіусу круга.

При визначенні аналітичної залежності приймалося, що абразивний круг, який обертається, впроваджується в заготовку із швидкістю подачі $V_{под}$, при цьому абразивні зерна є точковими джерелами тепла, проникаючого в зв'язку круга на деяку глибину

Представимо круг у вигляді твердого тіла, обмеженого різальною кромкою. Початкова температура тіла $f(x)$ дорівнює температурі довкілля, температура на різальній кромці ($x=0$) – $\varphi(t)$, тобто контактна температура, яка може бути визначена із залежності (1). Диференціальне рівняння теп-

лопровідності, що визначає поширення температури за радіусом круга, представимо у наступному вигляді:

$$\frac{\partial T_C}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2} \quad (2)$$

за початкових і граничних умов

$$T_C = f(x) = T_0 \quad \text{чи} \quad t = 0;$$

$$T_C = \varphi(x) = T_K \quad \text{чи} \quad x = 0,$$

де T_C – температура зв'язки круга, °К; t – час різання, с; α – коефіцієнт теплопровідності матеріалу круга м²/с, ($\alpha = 0,0000016$ м²/с); T_0 – температура навколишнього середовища, °К.

Згідно теорії теплопровідності [8, 9], температура у будь-якій точці тіла у момент часу $t > \tau$ з урахуванням граничних умов має вигляд:

$$T_C = \frac{x \cdot T_K}{2\sqrt{\pi\alpha}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{x^2}{4\alpha(t-\tau)}}}{(t-\tau)^{3/2}} \cdot \alpha \tau. \quad (3)$$

Із (3) визначаються величини температур в зв'язці круга, що залежать від теплофізичних властивостей зв'язки, часу різання та контактної температури (рис. 3).

Достовірність результатів, отриманих за

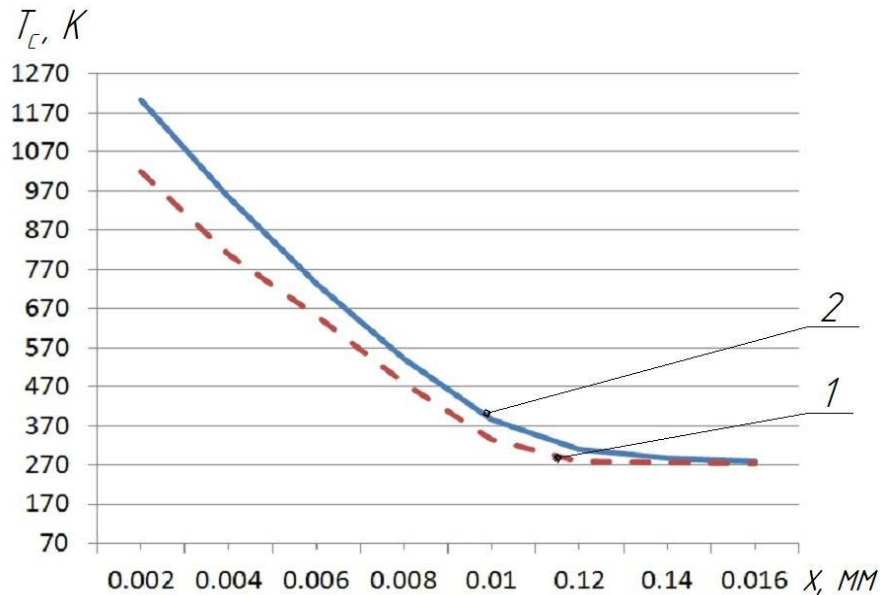


Рис. 3. Залежність зміни температур у зв'язки (T_C) від радіуса круга:
1 - експериментальні значення, 2 – розрахункові значення

Fig. 3. Dependence of temperature changes in the connection (T_C) from the radius of the circle:
1 - experimental values, 2 - estimated values

залежністю (3), перевірялася експериментальним шляхом. Встановлено, що зі збільшенням часу різання в зв'язці круга відбувається монотонне зростання температури аж до закінчення процесу різання. Так, на відстані від різальної кромки ($x = 10\text{мм}$) залежно від режимів температура складала $310 \dots 385^\circ\text{K}$, а на відстані від $x = 13\text{ мм}$ - дорівнює температурі навколишнього середовища.

Слід зазначити, що осцилограф показує зміну температури безперервно, тоді як термопари мають переривчастий контакт з матеріалом, що розрізається, тобто зафіксована середня температура зв'язки круга. Крім того, ділянка зв'язки круга знаходиться в межах дуги контакту приблизно одну восьму частини оберту круга (періоду). Іншу частину періоду термопара знаходиться поза контактом, тобто тепловий потік впливає на термопару періодичними імпульсами. При цьому температура термопари, що знаходиться в зв'язці круга, є також періодичною функцією, що зростає під час дії теплового потоку і зменшується під час охолодження, тобто зафіксована в процесі проведення експериментів температура зв'язки є заниженою. Цим слід пояснити,

що температури, отримані розрахунковим шляхом, дещо перевищують експериментальні.

Результати досліджень дозволяють досить обгрунтовано вибирати активні наповнювачі, що можуть поліпшити теплофізичні властивості зв'язки та зменшити негативний вплив температур поблизу різальної кромки, що, у свою чергу, дозволить створювати круги спеціального призначення для різання матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, а також з підвищеною зносостійкістю.

Визначено вплив теплових процесів на зносостійкість абразивних армованих кругів. Дослідження проводилися при різанні труб з вуглецевої сталі $57 \times 4\text{ мм}$, $76 \times 4\text{ мм}$, $89 \times 4\text{ мм}$ (сталь 10) зі швидкостями подач $0,2$; $0,4$; $0,63$; $0,8\text{ м/хв}$ і робочих швидкостях 50 , 65 , 86 м/с .

Встановлено, що зі збільшенням площі труби, що розрізається, зносостійкість круга зменшується. Це пояснюється тим, що при різанні більша кількість тепла переходить в зв'язку круга. У зв'язку з цим при експлуатації абразивних армованих кругів повинне дотримуватися раціональне співвідношення між площею перерізу труби,

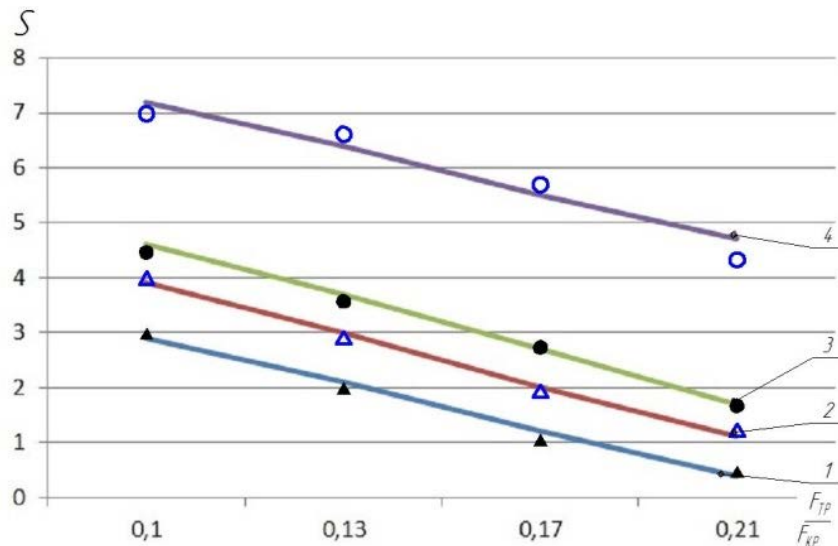


Рис. 4. Залежність зміни коефіцієнта шліфування (S) від відношення (F_{TP}/F_{KP}) при постійних робочих швидкостях і швидкостях подач: 1 - $V_{nod} = 0,8\text{ м/хв}$, $V_p = 65\text{ м/с}$, X18P10T; 2 - $V_{nod} = 0,8\text{ м/хв}$, $V_p = 65\text{ м/с}$, сталь 10; 3 - $V_{nod} = 0,2\text{ м/хв}$, $V_p = 65\text{ м/с}$, X18P10T; 4 - $V_{nod} = 0,2\text{ м/хв}$, $V_p = 65\text{ м/с}$, сталь 10

Fig. 4. Dependence of the change of the coefficient of grinding (S) on the ratio (F_{TP}/F_{KP}) at constant working speeds and feed rates: 1 - $V_{nod} = 0.8\text{ m/min}$, $V_p = 65\text{ m/s}$, X18P10T; 2 - $V_{nod} = 0.8\text{ m/min}$, $V_p = 65\text{ m/s}$, steel 10; 3 - $V_{nod} = 0.2\text{ m/min}$, $V_p = 65\text{ m/s}$, X18P10T; 4 - $V_{nod} = 0.2\text{ m/min}$, $V_p = 65\text{ m/s}$, steel 10

що розрізається, і площею різальної частини круга (F_{TP}/F_{KP}). При різанні кругами більшого діаметра величина (F_{TP}/F_{KP}) зменшується і, відповідно, створюється сприятливіший тепловий режим. Тому доцільно виконувати різання кругами з максимально можливим діаметром. На рис. 4 наведені залежності між коефіцієнтом шліфування S і відношенням (F_{TP}/F_{KP}) при постійних робочих швидкостях і швидкостях подач.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень визначено вплив теплових процесів на зносостійкість і якість поверхні матеріалів, що розрізають.

Результати роботи дозволяють створювати абразивні армовані круги спеціального призначення з підвищеними експлуатаційними показниками, зокрема для різання легованих сталей, кольорових металів і каменя.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Механізація* трудомістких процесів / Ю.Д. Абрашкевич, В.М. Смірнов, Л.Є. Пелевін, В.П. Рашківський. – Київ: КНУБА, 2006. – 180 с. – (КНУБА).
2. *Абрашкевич Ю. Д.* Вплив армування на безпеку експлуатації абразивних кругів / Ю. Д. Абрашкевич, Г. М. Мачишин, В. П. Тишковець. // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини.* – 2015. – № 85. – С. 54-59.
3. *Абрашкевич Ю. Д.* Експлуатація абразивних армированих кругів / Ю. Д. Абрашкевич, Л. Е. Пелевін, Г. Н. Мачишин. // *Монтажные и специальные работы в строительстве. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал.* – 2016. – № 4. – С. 30-32.
4. *Абрашкевич Ю. Д.* Підвищення ефективності машин з абразивним інструментом / Ю.Д. Абрашкевич, Г. М. Мачишин, О.В. Човнюк, Т.Ф. Щербина. // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини.* – 2016. – № 87. – С. 56-62.
5. *Абрашкевич Ю.* Вимоги до технології виготовлення, зберігання та безпечної експлуатації абразивних армованих кругів / Ю. Абрашкевич, Г. Мачишин, В. Тишковець. //

- Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2017. – № 89. – С. 48-55.
6. *Абрашкевич Ю.Д.* Влияние конструкции приводной машины на износостойкость абразивных армированных кругов / Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.Н. // *Монтажные и специальные работы в строительстве. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал.* - № 4. - 2017. - С. 7-9.
 7. *Основи теорії робочих процесів обробки будівельних матеріалів і конструкцій абразивним інструментом: монографія / Ю. Д. Абрашкевич, Л. Є. Пелевін, А.В. Фомін, О.М. Гаркавенко.* – К.: КНУБА, 2011. – 176 с.
 8. *Ликов А.А.* Теплообмен. М.: Энергия, 1978. – 479 с.
 9. *Абрашкевич Ю.Д.* Математична модель теплових процесів при роботі полімерно-абразивної щітки / Ю.Д. Абрашкевич, Г.М. Мачишин, О.В. Човнюк. // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини.* - Київ, 2014 - № 83 - С. 91-96.

REFERENCES

1. *Abrashkevich Ju.D., Smirnov V.M., Pelevin L.E., Rashkiv'skij V.P.* 2006. *Mehanizacija trudomistkih procesiv* [Mechanization of labor-intensive processes]. Kii'v, KNUCA Publ., 180. – (in Ukrainian).
2. *Abrashkevich Ju.D., Machishin G.M., Tishkovec' V.P.* 2015. *Vpliv armuvannja na bezpeku ekspluatacii abrazivnih krugiv* [Effect of reinforcement on the safety of the operation of abrasive wheels]. *Girnichij, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction, road and melioration machines], No.85. 54-59. – (in Ukrainian).
3. *Abrashkevich Ju.D., Pelevin L.E., Machishin G.N.* 2016. *Jekspluatacija abrazivnyh armirovannyh krugov* [Operation of abrasive reinforced wheels]. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve. Ezhemesjachnyj nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal* [Assembly and special works in construction. Monthly scientific, technical and production magazine], No.4, 30-32. – (in Russian).
4. *Abrashkevich Ju.D., Machishin G.M., Chovnjuk O.V., Shherbina T.F.* 2016. *Pidvishhennja effektivnosti mashin z abrazivnim instrumentom* [Improving the efficiency of machines with abrasive tool]. *Girnichij, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, construction,

- road and melioration machines], No.87, 56-62. – (in Ukrainian).
5. *Abrashkevich Ju., Machishin G., Tishkovec' V. 2017. Vimogi do tehnologii vigotovlennja, zberigannja ta bezpečnoї ekspluatacii abrazivnih armovanih krugiv [Requirements for the technology of manufacturing, storage and safe operation of abrasive reinforced circles]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and reclamation machines], No. 89, 48-55. - (in Ukraine).*
 6. *Abrashkevich Ju.D., Pelevin L.E., Machishin G.N. 2017. Vlijanie konstrukcii privodnoj mashiny na iznosostojkost' abrazivnyh armirovannyh krugov [Influence of the design of the drive machine on the wear resistance of abrasive reinforced wheels]. Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve. Ezhesmesjachnyj nauchno-tehnicheskij i proizvod-stvennyj zhurnal [Assembly and special works in construction. Monthly scientific, technical and production magazine], No. 4, 7-9. – (in Russian).*
 7. *Abrashkevich Ju.D., Pelevin L.E., Fomin A.V., Garkavenko O.M. 2011. Osnovi teorii robochih procesiv obrobki budivel'nih materialiv i konstrukcij abrazivnim instrumentom: monografija [The basis of the theory of the robotic processes of the obrobki of the ordinary material and the design of the abrasive tool: monograph]. Kyiv, KNUCA Publ., 176. – (in Ukrainian).*
 8. *Likov A.A., 1978. Teploobmen [Heat exchange], Moscow, Energija Publ., 479. – (in Russian).*
 9. *Abrashkevich Ju.D., Machishin G.M., Chovnjuk O.V. 2014. Matematichna model' teplovih procesiv pri roboti polimerno-abrazivnoї shhitki [Mathematical model of thermal processes in the work of a polymer-abrasive brush]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioration machines], No.83, 91-96. – (in Ukraine).*