

Łukasz ŻYŁKA<sup>1</sup>  
Robert BABIARZ<sup>2</sup>  
Marcin PŁODZIEN<sup>3</sup>  
Paweł SUŁKOWICZ<sup>4</sup>  
Wiktor BOBKO<sup>5</sup>  
Renata REMBIASZ<sup>6</sup>

## ZUŻYCIE ŚCIERNICY W SZLIFOWANIU CFG

W artykule przeprowadzono badania jednej z odmian szlifowania, którą jest szlifowanie głębokie z posuwem pelzającym, zwane szlifowaniem CFG (Creep-Feed Grinding). Charakteryzuje się ono dużymi wartościami dosuwu, co powoduje intensywne zużycie ściernicy. Ze względu na to, że jest to szlifowanie jednoprzęściowe i zużycie ściernicy postępujące podczas obróbki ma bezpośredni wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową szlifowanej powierzchni, przebadano zużycie promieniowe ściernicy w szlifowaniu CFG stopu Inconel 718. Zakres badań obejmował wpływ posuwu obciągania oraz objętości właściwej zeszlifowanego materiału na wielkość zużycia promieniowego ściernicy. Wykazano, że zużycie promieniowe ściernicy jest zależne głównie od objętości zeszlifowanego materiału. Nie wykazano istotnego wpływu zmiany parametrów obciągania ściernicy.

**Słowa kluczowe:** szlifowanie, szlifowanie CFG, zużycie ściernicy

### 1. Wprowadzenie

Jedną z odmian szlifowania jest szlifowanie głębokie z posuwem pelzającym, określane mianem szlifowania CFG (Creep-Feed Grinding). Proces ten charakteryzuje się bardzo małymi wartościami posuwu szlifowania oraz bardzo dużym dosuwem, dochodzącym nawet do 20 mm [2, 3]. Szlifowanie CFG charakteryzuje się dużą wydajnością i dobrą jakością obrabianej powierzchni. Znajduje zastosowanie głównie do szlifowania materiałów trudnoskrawalnych, np. stopów na osnowie niklu [2, 7]. Istotną zaletą szlifowania CFG są niższe koszty w stosunku do frezowania czy szlifowania konwencjonalnego. W przeciwień-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Łukasz Żyłka, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 8651374, e-mail: zylka@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Robert Babiarez, Politechnika Rzeszowska, e-mail: robertb@prz.edu.pl

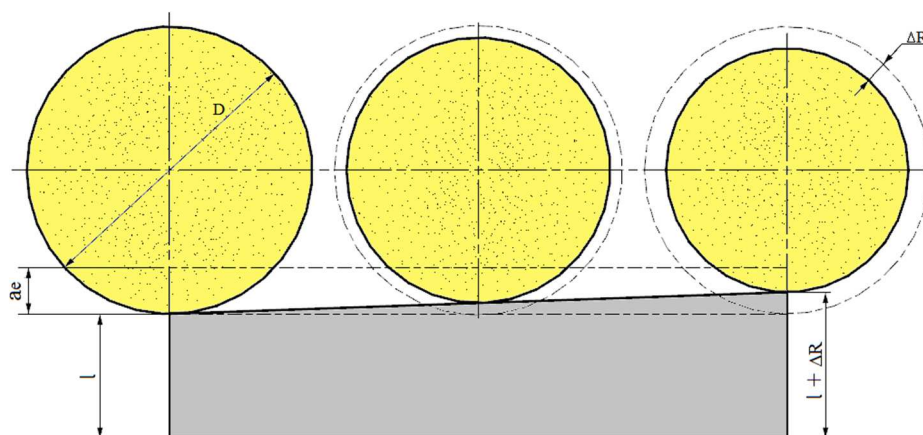
<sup>3</sup> Marcin Płodzień, Politechnika Rzeszowska, e-mail: plodzien@prz.edu.pl

<sup>4</sup> Paweł Sułkowicz, Politechnika Rzeszowska, e-mail: sulkowicz@prz.edu.pl

<sup>5</sup> Wiktor Bobko, absolwent Politechniki Rzeszowskiej

<sup>6</sup> Renata Rembiasz, absolwentka Politechniki Rzeszowskiej

stwie do klasycznego szlifowania postępowo-zwrotnego, w szlifowaniu CFG nie występują przestoje między przejazdami, gdyż materiał jest usuwany w jednym lub dwóch przejściach. Powoduje to jednak, że profil czynnej powierzchni ściernicy jest bezpośrednio odwzorowywany na powierzchni przedmiotu obrabianego. Bardzo ważnym zagadnieniem jest zatem poznanie procesów zużycia ściernicy i ich wpływu na jakość obrabianej powierzchni [6]. Ściernica w procesie szlifowania podlega różnorodnym rodzajom zużycia. Są to przede wszystkim ścieranie i wykruszanie ziaren ściernych, jak również zalepianie porów [1, 4, 5]. Procesy te z kolei powodują występowanie zużycia promieniowego ściernicy mającego wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową szlifowanej powierzchni, co zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Wpływ zużycia promieniowego ściernicy na wymiar przedmiotu

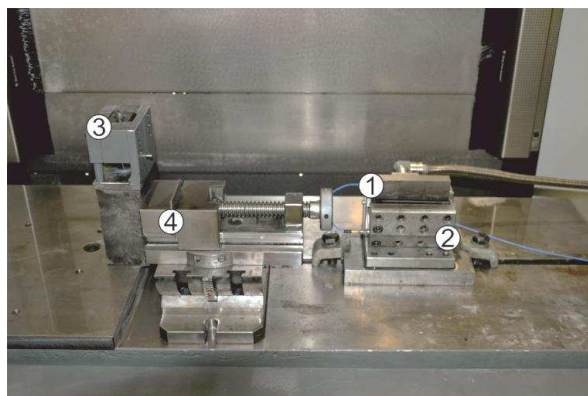
Fig. 1. The influence of radial wear of grinding wheel on the dimension of the workpiece

Zużycie promieniowe  $\Delta R$  wiąże się ze zmianą wymiaru charakterystycznego ściernicy  $D$ . W przypadku szlifowania jednoprejsiowego zużycie promieniowe postępuje wraz ze wzrostem objętości zeszlifowanego materiału i powoduje zmianę rzeczywistej wartości usuwanego nadmiaru obróbkowego. W konsekwencji wartość zużycia promieniowego ściernicy  $\Delta R$  zwiększa wymiar szlifowanego przedmiotu  $l$ . Powoduje również powstawanie błędów kształtu na długości szlifowania. Biorąc to pod uwagę, przeprowadzono badania doświadczalne w celu określenia zmian zużycia promieniowego ściernicy w szlifowaniu CFG.

## 2. Warunki badań

Badania doświadczalne procesu szlifowania CFG zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym zbudowanym z wykorzystaniem szlifierki CNC do płaszczyzn i profili FS 640Z firmy Geibel&Hotz (rys. 2). Pomiar składowych siły

szlifowania realizowano za pomocą 3-składowego siłomierza 9121 firmy Kistler. Siłomierz był podłączony do wzmacniacza ładunku Kistler 5070, a dane rejestrowane za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego USB 6215 firmy National Instrument.



Rys. 2. Stanowisko badawcze: 1 – próbka, 2 – siłomierz, 3 – obciążacz, 4 – blaszka

Fig. 2. Test stand: 1 – specimen, 2 – dynamometer, 3 – dresser, 4 – blade

Po każdym przejściu ściernicy był realizowany pomiar zużycia promieniowego przez odwzorowanie profilu ściernicy na blaszce ze stali S235 zamontowanej w imadle. Długość blaszek była równa wysokości ściernicy i wynosiła 50 mm, co pozwalało na odwzorowanie profilu całej powierzchni ściernicy. Blachy były skanowane za pomocą konturografu MarSurf XC 20 i określana była wartość zużycia promieniowego jako różnica pomiędzy wymiarami czynnej i biernej powierzchni ściernicy. Chropowatość szlifowanej powierzchni mierzono w pięciu punktach równo oddalonych od siebie na długości szlifowanej próbki.

Badania prowadzono ze stałymi parametrami szlifowania i obciążania zestawionymi w tab. 1. W pierwszym etapie badań zmieniano głębokość szlifowania w każdym przejściu ściernicy, co odpowiadało różnym wartościom właściwej objętości zeszlifowanego materiału. Po każdym przejściu ściernica była obciążana ze stałymi parametrami. Drugi etap badań polegał na szlifowaniu ze zmiennymi

Tabela 1. Parametry szlifowania i obciążania

Table 1. Grinding and dressing parameters

Parametry szlifowania	
Prędkość szlifowania	$v_s = 25 \text{ m/s}$
Prędkość posuwu szlifowania	$v_f = 80 \text{ mm/min}$
Szerokość szlifowania	$b = 15 \text{ mm}$
Długość szlifowania	$l = 80 \text{ mm}$
Parametry obciążania	
Dosuw obciążania	$a_d = 0,01 \text{ mm}$
Liczba przejść	$i_d = 5$

wartościami posuwu obciążania, a parametry szlifowania były stałe. Zastosowano ściernicę 43A-70-G15 firmy Krebs&Riedel z mieszaniną ziaren elektrokorundu i korundu rubinowego. Szlifowano ze stałymi parametrami chłodzenia (ciśnienie 2 MPa) i czyszczenia ściernicy (ciśnienie 8 MPa), stosując płyn obróbkowy w postaci 4% wodnego roztworu syntetycznego chłodziwa AquaTec 7000 firmy Oelheld.

### 3. Wyniki badań i ich analiza

W pierwszym etapie badań zmieniano w każdym przejściu szlifowania wartość dosuwu  $a_e$  z zakresu: 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4 mm. Każda wartość dosuwu odpowiadała określonej wartości właściwej objętości zeszlifowanego materiału. Po każdym przejściu mierzono zużycie promieniowe ściernicy, a wyniki zestawiono w tab. 2. Graficzne przedstawienie zmiany zużycia promieniowego ściernicy w funkcji właściwej objętości zeszlifowanego materiału przedstawia rys. 3.

Tabela 2. Wpływ dosuwu i objętości właściwej szlifowania na zużycie promieniowe ściernicy

Table 2. The influence of in-feed and specific volume of grinding on radial wear of grinding wheel

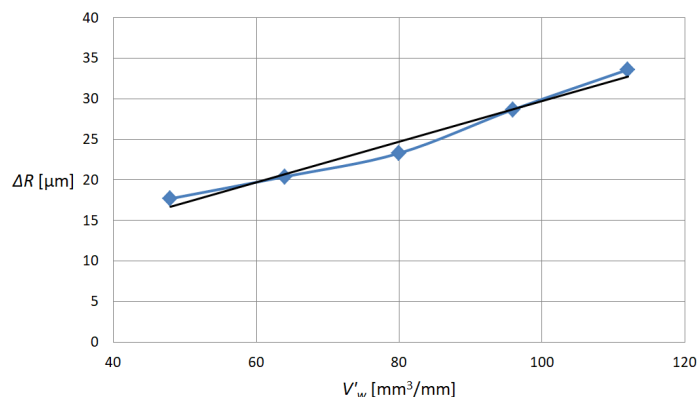
$a_e$ [mm]	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$V_w'$ [mm <sup>3</sup> /mm]	48	64	80	96	112
$\Delta R$ [μm]	17,7	20,4	23,3	28,7	33,6

Otrzymane wyniki aproksymowano prostą o równaniu  $\Delta R = 0,25V_w' + 4,7$ . Dopasowanie prostej wyniosło  $R^2 = 0,976$ . Otrzymane wyniki i zależność funkcyjna pozwalają na wyznaczenie zużycia promieniowego ściernicy w zależności od przewidywanej właściwej objętości szlifowanego materiału. Można przyjąć, że zużycie promieniowe jest proporcjonalne do objętości zeszlifowanego materiału. W praktyce pomocny może się okazać wskaźnik określający wielkość zużycia promieniowego, jakie przypada na 1 mm<sup>3</sup>/mm zeszlifowanego materiału. W tabeli 3 przedstawiono zatem wartości zmierzone i obliczone dla wszystkich prób szlifowania. Z analiz wynika, że dla zastosowanej ściernicy, materiału przedmiotu obrabianego i ustalonych warunków szlifowania średnie zużycie promieniowe ściernicy przypadające na 1 mm<sup>3</sup>/mm zeszlifowanego materiału wynosi:  $\Delta R = 0,3$  μm.

Tabela 3. Zużycie promieniowe ściernicy przypadające na 1 mm<sup>3</sup>/mm

Table 3. Radial wear of grinding wheel per 1 mm<sup>3</sup>/mm

$V_w'$ [mm <sup>3</sup> /mm]	48	64	80	96	112
$\Delta R/V_w'$ [μm]	0,28	0,31	0,3	0,31	0,3



Rys. 3. Zmiana zużycia promieniowego ściernicy w funkcji właściwej objętości zeszlifowanego materiału

Fig. 3. Change of radial wear as a function of specific volume of grinded material

Drugi etap badań polegał na określeniu wpływu jednego z parametrów obciążania ściernicy – posuwu obciążania na zużycie promieniowe. Parametr ten został wybrany głównie ze względu na to, że ma kluczowe znaczenie dla kształtowania topografii czynnej powierzchni ściernicy, czyli właściwości skrawne oraz zużycie. Podstawą do wyznaczenia posuwu obciążania jest wartość wskaźnika pokrycia  $k_d$ , który wyraża się zależnością:

$$k_d = \frac{b_d}{f_d} \quad (1)$$

gdzie:  $b_d$  – czynna szerokość obciążacza,  
 $f_d$  – posuw obciążania.

Czynna szerokość obciążacza  $b_d$  to szerokość obciążacza mierzona dla określonej wartości dosuwu obciążania. Dla dosuwu obciążania  $a_d = 0,01$  mm szerokość obciążacza  $b_d = 0,3$  mm. Z uwagi na to, że w procesie obciążania wielkością nastawną procesu jest prędkość posuwu obciążania  $v_{fd}$ , zależność (1) przekształcono, otrzymując wzór (2), tak aby móc wyznaczać bezpośrednio wartość  $v_{fd}$ :

$$v_{fd} = \frac{b_d \cdot n_s}{k_d} \quad (2)$$

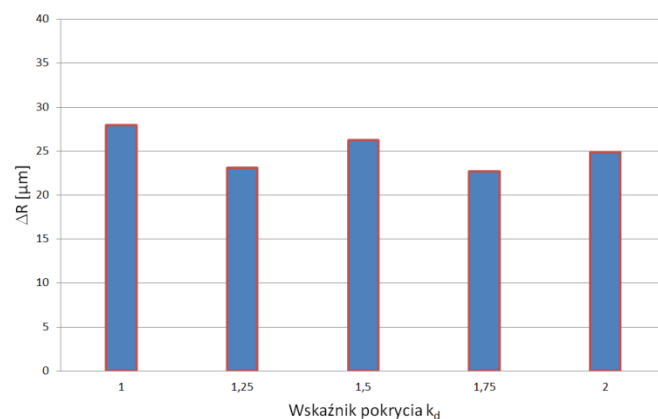
gdzie:  $v_{fd}$  – prędkość posuwu obciążania,  
 $b_d$  – czynna szerokość obciążacza,  
 $k_d$  – wskaźnik pokrycia,  
 $n_s$  – prędkość obrotowa ściernicy.

Badania przeprowadzono z prędkościami posuwu obciążania zestawionymi w tab. 4. Wyniki pomiarów zużycia promieniowego ściernicy zestawiono na rys. 4.

Tabela 4. Zmienne parametry procesu obciążania

Table 4. Variable parameters of dressing process

$k_d$	1	1,25	1,5	1,75	2
$v_{fd}$ [mm/min]	500	400	330	280	250

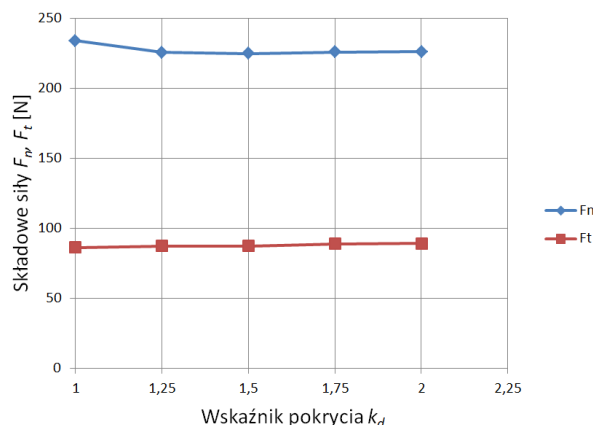


Rys. 4. Zmiana zużycia promieniowego ściernicy w funkcji wskaźnika pokrycia

Fig. 4. Change of radial wear of grinding wheel as a function of coverage ratio

Z przedstawionych na rys. 4 wyników można wywnioskować, że zmiana wskaźnika pokrycia w procesie obciążania nie ma istotnego wpływu na zużycie promieniowe ściernicy. W przeciwieństwie do objętości zeszlifowanego materiału prędkość posuwu obciążania wywiera znikomy wpływ na zużycie promieniowe. Wielkość zużycia promieniowego ściernicy wahała się w granicach  $\Delta R = 23\text{-}27 \mu\text{m}$ . Nie zauważono przy tym jednoznacznego trendu zmiany wartości  $\Delta R$ . Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że w szlifowaniu CFG stosuje się ściernice wielkoporowe o dość dużym ziarnie. W tego typu ściernicach ukształtowanie CPS jest zależne w mniejszym stopniu od parametrów obciążania. Decydujący wpływ ma charakterystyka ściernicy. Potwierdzeniem tego faktu mogą być wyniki chropowatości powierzchni, która była mierzona na długości próbki (odpowiednio do długości szlifowania). W każdym przypadku można zaobserwować, że na początku szlifowania (1/5 długości szlifowania) chropowatość jest znacznie niższa niż na pozostałej długości próbki (4/5 l). Tłumaczyć to można tym, że na początku szlifowania CPS jest ukształtowana przez proces obciążania,

natomiast w dalszej części procesu szlifowania CPS kształtują wielkość i rozmieszczenie ziaren ściernych oraz proces ich zużycia, które są niezależne od parametrów obciążania. Potwierdzeniem tego faktu może być rys. 5, który przedstawia wartości składowych siły szlifowania w funkcji wskaźnika pokrycia. Widać wyraźnie, że parametry obciążania nie wpływają istotnie na wartości sił w przeciwieństwie do klasycznego szlifowania.



Rys. 5. Zmiana składowych siły szlifowania w funkcji wskaźnika pokrycia

Fig. 5. Change of grinding force components as a function of coverage ratio

#### 4. Podsumowanie

Jednym z rodzajów zużycia ściernicy, jakie występują w procesie szlifowania, jest zużycie promieniowe. Jest ono związane ze zmianą promienia ściernicy w trakcie procesu obróbki. W przypadku szlifowania jednoprzęściowego, do którego zalicza się szlifowanie CFG, zmiana promienia ściernicy powoduje zmianę wymiaru szlifowanej powierzchni. W konsekwencji występują błędy kształtu i wymiaru szlifowanej powierzchni. Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że najsilniejszy wpływ na zużycie promieniowe ściernicy ma objętość zeszlifowanego materiału. Zużycie to rośnie proporcjonalnie do objętości usuniętego materiału, a dla przyjętych warunków badań przyrost zużycia wyniósł w przybliżeniu  $0,3 \mu\text{m}$  na  $1 \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Z badań wynika również, że zużycie promieniowe ściernicy nie zależy od przyjętych parametrów obciążania ściernicy. Zmieniono posuw obciążania w zakresie wskaźnika pokrycia  $k_d = 1-2$ . Zmiana zużycia promieniowego ściernicy wyniosła około 10%, a zmiana miała charakter losowy.

#### Literatura

- [1] Ahrens M., Damm J., Dagen M., Denkena B., Ortmaier T.: Estimation of dynamic grinding wheel wear in plunge grinding, *Procedia CIRP*, 58 (2017) 422-427.

- [2] Grigoriev S.N., Starkov V.K., Gorin N.A., Krajnik P., Kopač J.: Creep-feed grinding: an overview of kinematics, parameters and effects on process efficiency, *J. Mech. Eng.*, 60 (2014) 213-220.
- [3] Malkin S., Changsheng G.: *Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008.
- [4] Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky V.: Analysis of relation between grinding wheel wear and abrasive grains wear, *Procedia Eng.*, 150 (2016) 809-814.
- [5] Oczóś K., Porzycki J.: *Szlifowanie*. WNT, Warszawa 1986.
- [6] Ortega N., Bravo I., Pombo H., Sánchez J.A., Vidal G.: Thermal analysis of creep feed grinding, *Procedia Eng.*, 132 (2015) 1061-1068.
- [7] Sikora M., Lajmert P., Ostrowski D., Kruszyński B.: Szlifowanie stopów niklu na szlifierce kłowej do wałków, *Mechanik*, 87 (2014) CD, 289-292.

## GRINDING WHEEL WEAR IN CREEP-FEED GRINDING

### Summary

One of the grinding methods is deep grinding with slow feed, called Creep-Feed Grinding (CFG). The CFG process analysed in this paper is characterized by high in-feed values what causes intensive wear of grinding wheel. Due to the fact that it is one-pass grinding, grinding wheel wear during machining has an influence on dimensional and shape accuracy of grinding surface. Taking the above mentioned into account, the experimental study of radial wear of grinding wheel in CFG of Inconel 718 was performed. The influence of the dressing feed and the volume of grinded material on the radial wear of the grinding wheel were determined. It was found that radial wear of grinding wheel mainly depends on the volume of grinded material. The significant effect of the change in parameters of grinding wheel dressing was not revealed.

**Keywords:** Grinding, creep-feed grinding, grinding wheel wear

DOI: 10.7862/rm.2017.38

*Otrzymano/received: 12.07.2017*

*Zaakceptowano/accepted: 27.09.2017*