



Wybrane aspekty procesu nagniatania

Some aspects of the burnishing process

KAZIMIERZ CZECHOWSKI
JANUSZ KALISZ*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.5-6.203

Prezentowano wybrane aspekty modyfikowania toczonej lub frezowanej powierzchni przedmiotów ze stopów metali poprzez nagniatanie toczne. Omówiono wpływ procesu nagniatania na niektóre geometryczne i fizyczne parametry powierzchni. Zamieszczono przykładowe wyniki badań doświadczalnych dotyczących nagniatania bezkłowego wałów oraz nagniatania tocznego powierzchni przestrzennych uprzednio frezowanych. Wyniki te potwierdzają możliwość uzyskania – dzięki frezowaniu i nagniataniu – bardzo niskiej chropowatości powierzchni przestrzennej oraz korzystnego udziału materiałowego jej profilu, wpływających na właściwości funkcjonalne generowanych powierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: nagniatanie toczne, nagniatanie powierzchni frezowanej, chropowatość powierzchni, udział materiałowy profilu chropowatości

Some aspects of the surface finish treatment by roller burnishing of the as turned or as milled surfaces of metal alloys are presented. Discussed is the effect of burnishing process on some of the geometric and physical surface features. There are also attached exemplary results of centerless burnishing shafts and results of the research tests carried out on three dimensional milled surfaces consequently submitted to the roller burnishing operation. These results prove that very low roughness levels could be achieved on 3D shaped surfaces with advantageous share of material which improve functional properties of the surface generated by milling and burnishing.

KEYWORDS: roller burnishing, milled surface burnishing, surface roughness, material share of roughness profile

Odporność elementów maszyn i innych wyrobów na zużywanie się jest najczęściej determinowana właściwościami ich warstwy wierzchniej, w tym m.in.: strukturą geometryczną powierzchni, twardością materiału i stanem naprężeń własnych pozostałych po obróbkach. Odpowiednie właściwości warstwy wierzchniej części maszyn kształtuje się zwykle w procesach obróbki mechanicznej, którą często poprzedza obróbka cieplna, a czasem również ciepłno-chemiczna. Wybór właściwego sposobu obróbki zależy przede wszystkim od głównego celu, w jakim się ją stosuje.

Jednym z rodzajów obróbki wykończeniowej jest nagniatanie, polegające na miejscowym odkształcaniu plastycznym na zimno przedmiotu wskutek siłowego oraz kinetycznego współdziałania narzędzia z powierzchnią obrabianą. Oddziaływanie na powierzchnię obrabianą gładkiego i praktycznie nieodkształcalnego narzędzia powoduje przemieszczenie nierówności i zgniot powierzchni, wpływające korzystnie na właściwości warstwy wierzchniej. Nagniatanie wykorzystuje się najczęściej wtedy, gdy potrzebne jest jednocześnie zmniejszenie chropowatości powierzchni, zwiększenie udziału materiałowego jej profilu, wzmocnienie warstwy wierzchniej materiału i uzyskanie w niej korzystnego stanu naprężeń ściskających – np. w celu zwiększenia

odporności na ścieranie, zapewnienia trwałości pasowania i zdolności przenoszenia większych nacisków powierzchniowych oraz poprawienia wytrzymałości zmęczeniowej części [1]. Nagniatanie jest również korzystne, ponieważ zapewnia [1]:

- uzyskanie powierzchni z dużymi promieniami zaokrągleń wierzchołków i wgłębień profilu,
- zachowanie ciągłości wewnętrznych włókien metalu,
- minimalne nagrzewanie się przedmiotu podczas obróbki (co wyklucza ryzyko jego deformacji cieplnej, przypalenia czy odwęglenia),
- brak na powierzchni poddanej nagniataniu twardych odprysków (ziaren ścierniwa, cząstek narostu i wiórów),
- uzyskanie małego współczynnika tarcia oraz dobrej przyczepności do powierzchni środków smarujących i nakładanych galwanicznie powłok,
- uzyskanie powierzchni z dużym współczynnikiem odbicia światła,
- zwiększenie odporności na korozję powierzchniową.

Nie można pominąć także ekologicznego aspektu nagniatania – jest to bowiem obróbka bez wiórów i pyłów, o małej emisji hałasu i niskiej energochłonności [1].

W nagniataniu metodami mechanicznymi wykorzystuje się nacisk narzędzia (nagniatanie naporowe) albo energię kinetyczną narzędzia lub swobodnych cząstek (nagniatanie udarowe). W nagniataniu naporowym nacisk narzędzia jest wywierany – w sposób sprężysty lub sztywny – przez krążek (krążkowanie), kulkę (kulkowanie) lub rolkę (rolkowanie). W nagniataniu udarowym wykorzystuje się energię kinetyczną cząstek w postaci kulek lub śrutu, miotanych siłą odśrodkową lub strumieniem sprężonego powietrza (kulowanie), albo energię kinetyczną narzędzia uderzającego w powierzchnię przedmiotu obrabianego (młotkowanie). Istnieją także odmiany nagniatania, w których łączone są różne metody nagniatania mechanicznego albo metody mechaniczne z innymi metodami [1].

Standardowe i specjalne narzędzia do nagniatania – zarówno oferowane przez różne firmy, jak i wykonywane na zamówienie przez Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) – umożliwiają wybór metody nagniatania w zależności od:

- twardości materiału obrabianego,
- posiadanego parku obrabiarkowego,
- kształtu przedmiotu,
- wymagań co do dokładności i chropowatości powierzchni.

W IZTW wytwarzane są narzędzia i przyrządy do nagniatania naporowego tocznego i ślizgowego, przeznaczone do tokarek i frezarek konwencjonalnych oraz sterowanych numerycznie (przedstawiono je m.in. w miesięczniku *Mechanik*: nr 12/2013 i nr 10/2014), w tym narzędzia specjalne, stosowane w szczególnych przypadkach, np. w nagniataniu wałów o dużej smukłości. Wydajność nagniatania można zwiększać dzięki wolno stojącym urządzeniom specjalnym, takim jak oferowane przez IZTW urządzenie do wydajnego wielkoseryjnego nagniatania bezkłowego wałów.

* Dr inż. Kazimierz Czechowski, mgr inż. Janusz Kalisz (ios@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

Ciągły postęp techniczny znacznie ułatwia wykorzystanie nagniatania w takich obszarach, w których do tej pory było ono stosowane sporadycznie, np. w obróbce powierzchni przestrzennych na frezarkach. Przedstawione dalej wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w IZTW potwierdzają, że dzięki frezowaniu i nagniataniu możliwe jest uzyskanie bardzo niskiej chropowatości powierzchni przestrzennej i korzystnego udziału materiałowego jej profilu, co poprawia właściwości funkcjonalne kształtowanych powierzchni.

Nagniatanie bezkłowe

Proces nagniatania bezkłowego jest obróbką z posuwem samoczynnym przedmiotu. Ze względu na konieczność zapewnienia wysokiej wydajności obróbki w tym przypadku stosuje się narzędzia nagniatające w postaci wymiennych głowic wielorolkowych, mocowanych w wolno stojącym urządzeniu specjalnym. Wały są podawane do strefy obróbki ręcznie lub automatycznie, do momentu aż uchwycą je rolki nagniatające. Następnie podczas obróbki wały są prowadzone przez rolki, a po wykonaniu nagniatania – gromadzone w zespole odbierającym. Samoczynny posuw jest rezultatem skośnego (w stosunku do osi wału) ustawienia rolek w gniazdach koszyka. Teoretyczną wartość posuwu samoczynnego określa zależność:

$$f_s = \pi \times d' \times \tan \alpha$$

gdzie: d' – średnica wału przed nagniataniem, α – kąt między osią wału i rolki.

W praktyce wartość posuwu samoczynnego zależy również od wielkości wciśnięcia nagniatania (definiowanego jako różnica średnicy wału przed nagniataniem i średnicy nastawienia głowicy rolkowej) – im jest on większy, tym mniejszy posuw.

Urządzenie do bezkłowego nagniatania wałów może być wykonane w wersji przelotowej (pracujące w sposób opisany wcześniej) lub nieprzelotowej (do nagniatania wałów stopniowych). W tym drugim przypadku następuje wprowadzenie wału do zespołu nagniatającego na odpowiednią długość tworzącej – po zwiększeniu średnicy tego zespołu; następnie po zaciśnięciu z wymaganą siłą rolek na powierzchni obrabianej wał w czasie obróbki wysuwa się samoczynnie z zespołu nagniatającego.

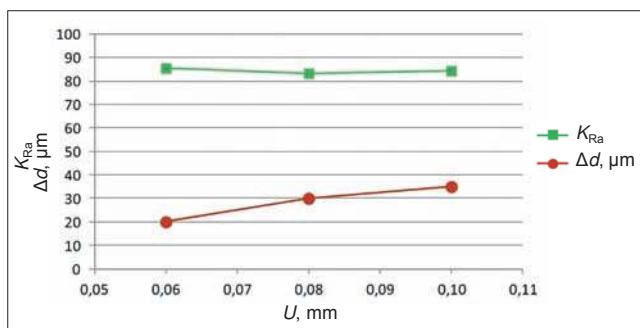
Za pomocą urządzenia do bezkłowego nagniatania prowadzono w IZTW m.in. nagniatanie wałów o średnicy $d=30$ mm i długości $L=200$ mm, wykonanych ze stali 36CrNiMo4 w stanie surowym. Przed nagniataniem i po nim mierzono średnicę zewnętrzną d oraz parametr chropowatości powierzchni Ra – do tego celu stosowano mikrometr oraz profilometr Hommel Tester T1000. Przed nagniataniem wały były toczne – parametr chropowatości Ra wynosił wówczas $6,0 \div 7,5 \mu\text{m}$. Nagniatanie prowadzono za pomocą specjalnych głowic rolkowych, które smarowano niewielką ilością oleju. Podstawowe parametry i wyniki nagniatania wałów zamieszczono w tabl. I. Na rys. 1 przedstawiono wpływ wciśnięcia nagniatania U na współczynnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} (stanowiący iloraz parametrów Ra przed nagniataniem i po nagniataniu) oraz na zmianę średnicy po nagniataniu Δd . Z kolei na rys. 2 pokazano wpływ wciśnięcia nagniatania na posuw rzeczywisty f i czas maszynowy t_{m100} .

Na podkreślenie zasługuje fakt, że po nagniataniu bezkłowym (dla jednego przejścia narzędzia) osiągnięto bardzo małe wartości chropowatości powierzchni – rzędu $Ra=0,08 \mu\text{m}$, natomiast wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni wyniósł ponad 80. Nagniatanie bezkłowe wałów może być bardzo wydajną obróbką: w przypadku nagniatania stali 36CrNiMo4 samoczynny posuw rzeczywisty f wynosił $0,97 \div 1,46$ mm/obr (w zależności od wartości wciśnięcia U), a posuw czasowy f_t $1020 \div 1530$ mm/min. Wałki o długości 200 mm nagniatano przez $8 \div 12$ s.

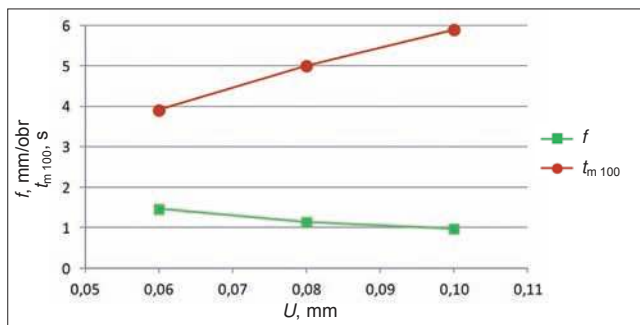
TABLICA I. Wyniki badań nagniatania bezkłowego wałów ze stali 36CrNiMo4

Średnica wałka d , mm	30		
Posuw samoczynny (obliczony) f_s , mm/obr	1,648		
Prędkość obwodowa nagniatania v , m/min	99		
Wcisk nagniatania U , mm	0,06	0,08	0,10
Posuw czasowy f_t , mm/min	1530	1200	1020
Posuw rzeczywisty f , mm/obr	1,46	1,14	0,97
Parametr chropowatości po nagniataniu Ra , μm	0,08	0,08	0,08
Zmiana średnicy po nagniataniu Δd , mm	0,02	0,03	0,035
Czas maszynowy t_{m100} , s	3,9	5,0	5,9
Współczynnik K_{Ra}	85,5	83,3	84,4

Uwaga: Podano wartości średnie parametru Ra , zmiany średnicy Δd , posuwów f i f_t , czasu maszynowego t_{m100} oraz współczynnika zmniejszenia chropowatości K_{Ra} (liczność prób: 50)



Rys. 1. Wpływ wciśnięcia nagniatania U na współczynnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} i zmianę średnicy Δd po nagniataniu bezkłowym stali 36CrNiMo4



Rys. 2. Wpływ wciśnięcia nagniatania U na posuw rzeczywisty f i czas maszynowy t_{m100} podczas nagniatania bezkłowego stali 36CrNiMo4

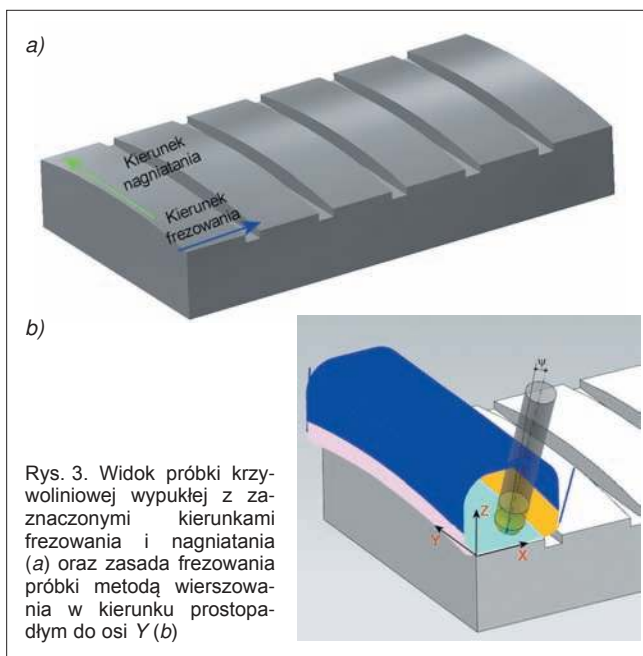
Frezowanie i nagniatanie powierzchni przestrzennych

W przemyśle coraz powszechniej stosuje się sekwencyjną obróbkę – frezowanie i nagniatanie – umożliwiającą uzyskanie powierzchni o niskiej chropowatości. Aby otrzymać chropowatość powierzchni porównywalną – ze względu na parametry Ra (2D) i Sa (3D) – z powierzchnią polerowaną, przeprowadzono w IZTW badania frezowania i nagniatania tocznego stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A) w stanie utwardzenia T451 z atestem hutniczym 3.1.

Do badań wykorzystano próbki krzywoliniowe wypukłe, na których wydzielono sześć pól o wymiarach 80×20 mm i promieniu krzywizny 250 mm (rys. 3a). Powierzchnie próbek frezowano kształtując frezem kulistym (VHM) o średnicy 8 mm, z następującymi parametrami skrawania:

- głębokość skrawania $a_p=0,5$ mm,
- posuw na ostrze $f_z=0,04$ mm/ostrze,
- posuw poprzeczny $f_{wf}=0,53$ mm/min,
- prędkość skrawania $v_c=530$ m/min.

Zabieg frezowania (rys. 3b) przeprowadzono metodą wierszowania w kierunku prostopadłym do osi Y, ze stałym



odchyleniem frezu od normalnej do powierzchni o kąt $\psi=7,5^\circ$, natomiast nagniatanie – w kierunku ortogonalnym (prostopadłym) do kierunku frezowania.

Proces frezowania i nagniatania realizowano w jednym przejściu na 5-osiowym centrum frezarskim DMC 75V Linear, za pomocą wykonanego w IZTW nagniatąka tocznego (rys. 4) z kulistym elementem nagniatającym ceramicznym (Si_3N_4) o promieniu 4 mm. Próby nagniatania przeprowadzono na wszystkich polach ze stałym dosunięciem 0,3 mm (ugięciem sprężyny nagniatąka po zetknięciu się jego elementu roboczego z powierzchnią obrabianą) i posuwem roboczym $f_t=6000$ mm/min. Wartości siły nagniatania wynosiły $F_n=\{25, 50, 75, 100\}$ N, natomiast wartość posuwu poprzecznego $f_{wn}=0,04$ mm. W tabl. II przedstawiono skróty literowe odpowiadające kolejnym operacjom.



Rys. 4. Nagniatąk toczny, wykonany w IZTW, z końcówką wyposażoną w element roboczy w postaci kulki ceramicznej (Si_3N_4)

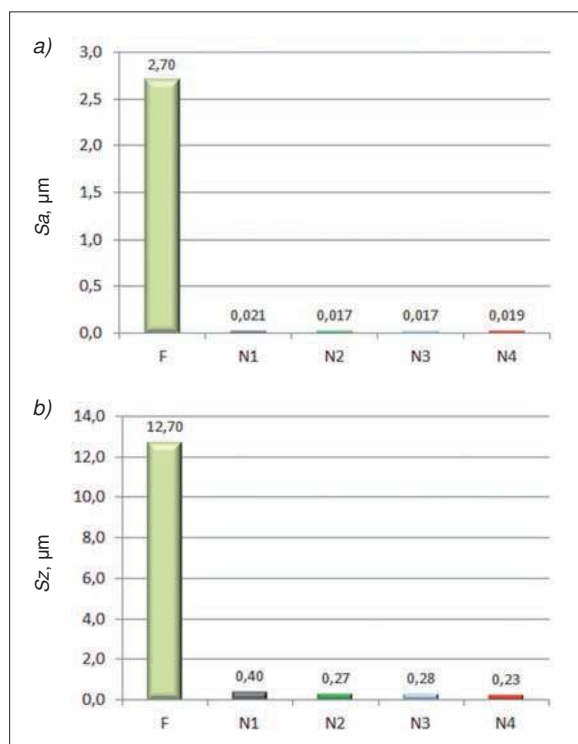
TABLICA II. Skróty literowe odpowiadające kolejnym operacjom

Symbol	Opis	Posuw wierszowania f_{wn} , mm	Siła nacisku F_n , N
F	Frezowanie	–	–
N1	Nagniatanie	0,04	25
N2			50
N3			75
N4			100

W celu zmniejszenia tarcia i zapewnienia dużej trwałości nagniatąka podczas nagniatania jako środek smarujący stosowano olej maszynowy. Procesy technologiczne frezowania i nagniatania opracowano z wykorzystaniem systemu NX CAM. Pomiar parametrów chropowatości w układzie 3D przeprowadzono za pomocą profilometru TOPO 01P (produkcji IZTW).

Analizie poddano znormalizowane parametry chropowatości 3D w celu opisanego stanu i właściwości funkcjonalnych generowanych powierzchni. Można stwierdzić, że po frezowaniu otrzymuje się powierzchnie o specyficznych cechach geometrycznych – o bardzo ostrych, regularnie rozmieszczonych wierzchołkach i wgłębieniach. Nagniatanie powoduje zmniejszenie nierówności powierzchni, ze znacznym zaokrągleniem wierzchołków i wgłębień, oraz poprawia właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej. Przez stosowanie różnych sił nagniatania uzyskuje się powierzchnie o różnej fakturze.

Na rys. 5÷10 pokazano geometryczny stan powierzchni otrzymanych po frezowaniu i nagniataniu tocznym. Wartości parametrów chropowatości powierzchni S_a i S_z dla pięciu przypadków obróbki przedstawiono na rys. 5. Po frezowaniu stopu aluminium otrzymano: $S_a=2,7 \mu\text{m}$, $S_z=12,7 \mu\text{m}$. Nagniatanie powoduje zmniejszenie wartości S_a do $0,017 \mu\text{m}$, a parametru S_z – do $0,23 \mu\text{m}$.

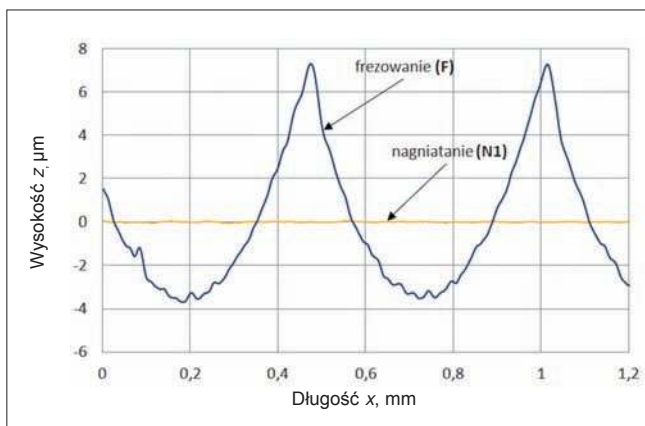


Rys. 5. Porównanie parametrów chropowatości S_a i S_z po frezowaniu (F) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu (N1, N2, N3, N4)

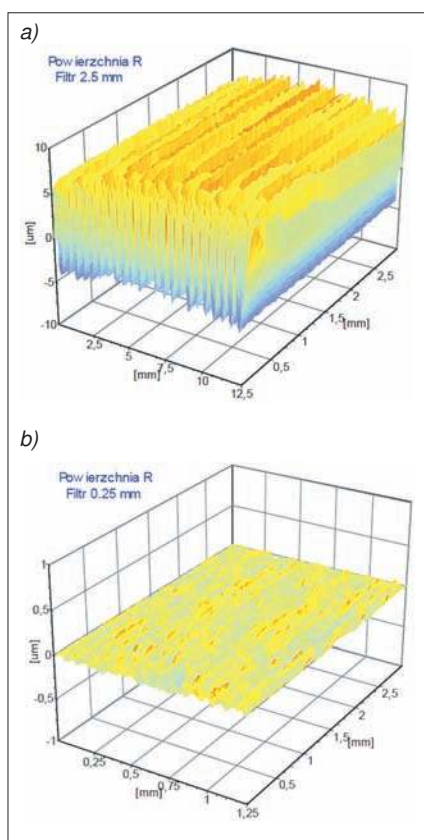
Efekt nagniatania powierzchni widać na rys. 6, przedstawiającym porównanie profili powierzchni otrzymanych po frezowaniu i następującym po nim nagniataniu, a także na rys. 7, pokazującym topografię 3D po frezowaniu oraz po sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu. W wyniku nagniatania wszystkie ostre wierzchołki profilu powierzchni frezowanej zostały całkowicie zdeformowane, a wygenerowany profil powierzchni jest bardzo gładki.

Powierzchnie po frezowaniu mają profile o niedostatecznych właściwościach nośnych, z krzywymi udziału materiałowego typu degresywnego z bardzo wysoką wartością parametru $Spk=5,81 \mu\text{m}$, natomiast po nagniataniu następuje korzystna zmiana kształtu krzywych udziału materiałowego – z niewielką częścią o charakterze degresywnym i większą częścią o charakterze progresywnym (rys. 8), a parametru Spk zostaje zredukowany do $0,023\pm 0,031 \mu\text{m}$.

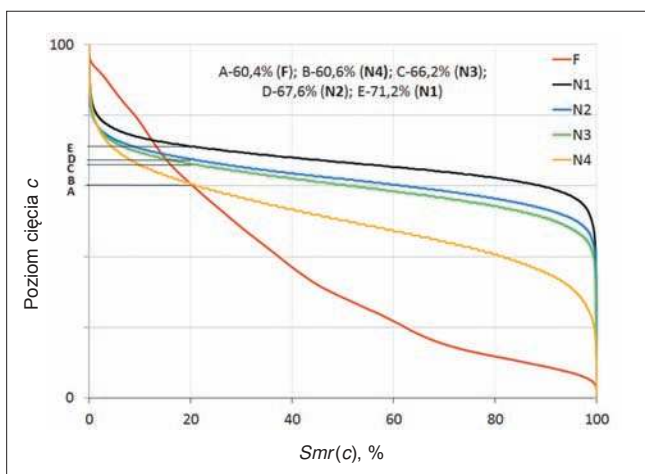
Na podstawie wartości udziału materiału na głębokości 20% ($S_{mr}(20)$) można stwierdzić, że operacje nagniatania zwiększają wartość udziału materiałowego z poziomu 60,4% do 71,2% na górnej granicy rdzenia. Należy dodać, że znaczne różnice w wartościach S_{mr} można uzyskać na poziomach krzywych udziału materiałowego w obrębie wgłębień.



Rys. 6. Przykład profilu powierzchni otrzymanego po frezowaniu (F) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu (F + N1)



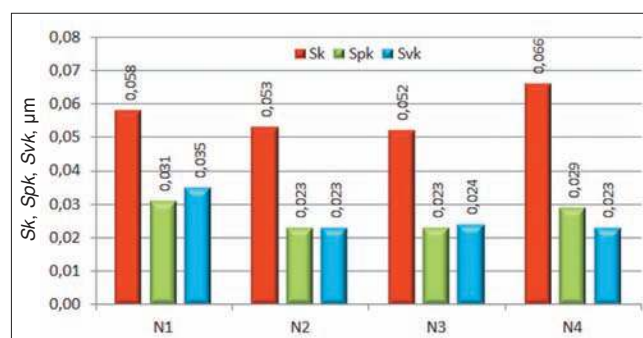
Rys. 7. Przykłady topografii powierzchni otrzymanych po frezowaniu (F) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu (F + N1) – po usunięciu kształtu i zastosowaniu filtra falistości



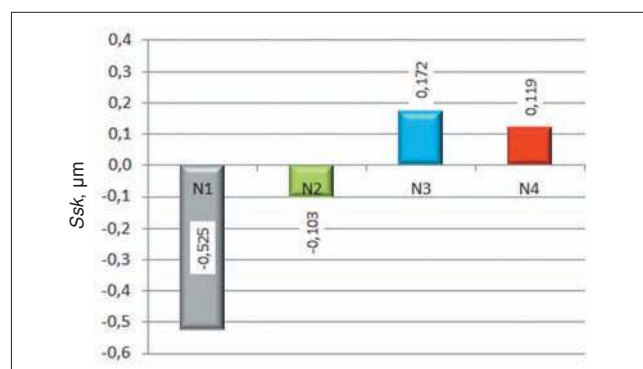
Rys. 8. Porównanie krzywych udziału materiałowego po frezowaniu (F) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu (N1, N2, N3, N4)

W zależności od siły nagniatania właściwości powierzchni mogą być zróżnicowane, co widać w przypadku parametrów krzywej udziału materiałowego Sk , Spk i Svk (rys. 9) i wartości asymetrii (skośności) rozkładu rzędnych powierzchni Ssk (rys. 10).

Analizując tylko powierzchnie po nagniataniu, zaobserwowano, że parametr Ssk dla nagniatania z siłą docisku $F_n = 25$ N (N1) i $F_n = 50$ N (N2) ma ujemne wartości. W przypadku pozostałych powierzchni po nagniataniu (N3, N4) generowane są krzywe udziału materiałowego, dla których wartość Ssk jest dodatnia, co może oznaczać powierzchnie o większej sztywności stykowej.



Rys. 9. Parametry krzywej udziału materiałowego Sk , Spk i Svk po nagniataniu powierzchni uprzednio frezowanej



Rys. 10. Parametr asymetrii powierzchni Ssk po nagniataniu powierzchni uprzednio frezowanej

Wyniki wskazują na możliwość uzyskania powierzchni o wysokiej gładkości po obróbce obejmującej kształtowanie i wykończeniowe nagniatanie stopu aluminium. Nagniatanie po frezowaniu jest procesem złożonym, a istotny wpływ na jego końcowy efekt ma sposób przygotowania powierzchni pod nagniatanie – właśnie dlatego operację składającą się z tych dwóch zabiegów technologicznych należy traktować całościowo.

Podsumowanie

Prowadzenie nagniatania na obrabiarkach sterowanych numerycznie pozwala na efektywną obróbkę wykończeniową powierzchni frezowanych o złożonych kształtach. Wyniki badań przeprowadzonych w IZTW potwierdziły możliwość uzyskiwania powierzchni o bardzo niskich wartościach chropowatości – dotyczy to zarówno elementów wykonanych ze stopów aluminium poddanych sekwencyjnej obróbce polegającej na frezowaniu, a następnie nagniataniu, jak i wałów ze stali poddanych bardzo wydajnej obróbce metodą nagniatania bezkłowego.

LITERATURA

1. Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987. ■