

# Analysis of the selected machining factors influence on the milling process of grey cast iron

## Analiza wpływu wybranych czynników obróbki na przebieg procesu frezowania żeliwa szarego

PIOTR ZIARKOWSKI  
KAMIL KLAMCZYŃSKI  
RADOSŁAW SÓJKA  
NATALIA KOWALSKA  
SŁAWOMIR BŁASIAK  
ŁUKASZ NOWAKOWSKI  
MICHAŁ SKRZYNIARZ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.11.22>

The quality of the geometric structure of a surface is influenced by factors such as the geometry of the cutting tool, the cutting conditions and the displacements in the tool-workpiece system. This paper describes the results of a study to analyse the influence of selected machining factors accompanying the face milling process on the geometric structure of the surface. During the machining tests, relative displacements in the T-W system were recorded, as well as the components of forces and moments of the face milling process for specimens made of grey cast iron. The tests were carried out on an AVIA VMC 800 milling centre, and the accuracy of the machined surface was checked. A Talysurf CCI – Lite Non-contact 3D Profiler, which was equipped with TalyMap Platinum software, was used to measure the geometric structure of the surface.

**KEYWORD:** machining, milling, grey cast iron, geometrical structure of the surface, components of cutting forces, relative movements

Na jakość struktury geometrycznej powierzchni wpływają takie czynniki, jak: geometria narzędzia skrawającego, warunki skrawania oraz przemieszczenia w układzie narzędzie–przedmiot obrabiany. W artykule opisano wyniki badań, których celem była analiza wpływu wybranych czynników obróbki towarzyszących procesowi frezowania czołowego na strukturę geometryczną powierzchni. W trakcie prób skrawania rejestrowano przemieszczenia względne w układzie N-P oraz składowe siły i momenty procesu frezowania walcowo-czołowego próbek wykonanych z żeliwa szarego. Próby przeprowadzono na centrum frezarskim AVIA VMC 800. Sprawdzono dokładność wykonania powierzchni poddanej obróbce frezarskiej. Strukturę geometryczną powierzchni zmierzono profilometrem

Talysurf CCI – Lite Non-contact 3D Profiler, wyposażonym w oprogramowanie TalyMap Platinum.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka skrawaniem, frezowanie, żeliwo szare, struktura geometryczna powierzchni, składowe siły skrawania, przemieszczenia względne

### Wprowadzenie

Wysokie wymagania współczesnego przemysłu maszynowego wyrażają się w dążeniu do zwiększenia produktywności z zachowaniem wysokiej jakości wykonania elementów. Celem tych wymogów jest zwiększenie ilości usuwanego materiału w jednostce czasu poprzez podniesienie prędkości obrotowej wrzeciona, zwiększenie posuwu i głębokości skrawania z zachowaniem wymagań dotyczących dokładności wymiarowo-kształtowej oraz chropowatości powierzchni przedmiotów obrabianych.

Wymagania dotyczące wymiarów części wytwarzanych podczas frezowania określa się w kategoriach błędów wymiarowych oraz odchyłek geometrycznych i wykończenia powierzchni, które mogą być spowodowane problemami powstałymi podczas usuwania wiórów.

Chropowatość powierzchni jest powszechnie stosowanym wskaźnikiem jakości wyrobu i w większości przypadków wymogiem technicznym wobec wyrobów mechanicznych. Osiągnięcie pożądanej jakości struktury geometrycznej powierzchni ma ogromne znaczenie dla zachowania funkcjonalności części. Z drugiej strony zależny od procesu charakter mechanizmu powstawania chropowatości powierzchni wraz z licznymi niekontrolowanymi czynnikami, które

\* Mgr inż. Piotr Ziarkowski – [pziarkowski@tu.kielce.pl](mailto:pziarkowski@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0002-1104-4928> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska  
Mgr inż. Kamil Klamczyński – [kklamczynski@tu.kielce.pl](mailto:kklamczynski@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0002-8380-210X> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska  
Mgr inż. Radosław Sójka – [rsojka@tu.kielce.pl](mailto:rsojka@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0003-2586-0237> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska  
Mgr inż. Natalia Kowalska – [nkowalska@tu.kielce.pl](mailto:nkowalska@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0003-3043-7812> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska  
Dr hab. inż. Sławomir Błasiak, prof. PŚk – [sblasiak@tu.kielce.pl](mailto:sblasiak@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0001-7333-4026> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska  
Dr inż. Łukasz Nowakowski – [lukasn@tu.kielce.pl](mailto:lukasn@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0002-2425-7295> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska  
Dr inż. Michał Skrzyniarz – [mskrzyniarz@tu.kielce.pl](mailto:mskrzyniarz@tu.kielce.pl), <https://orcid.org/0000-0003-4590-5842> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska

wpływają na odpowiednie zjawiska, praktycznie uniemożliwiają znalezienie prostego rozwiązania.

Na proces frezowania wykończeniowego powierzchni części wpływa kilka czynników, w tym: warunki skrawania, zużycie narzędzia, odkształcenia sprężyste i plastyczne powierzchni części w wyniku działania sił skrawania oraz materiały, z jakich wykonane są obrabiany przedmiot i narzędzie skrawające. Ponadto należy uwzględnić błędy geometrii narzędzia i obrabiarki ze względu na ich duże znaczenie w powstawaniu śladów na powierzchniach tworzonych przez ostrza narzędzia podczas skrawania [1–4].

Istotny wpływ na chropowatość powierzchni frezowanych czołowo ma bicie ostrzy zamocowanych w korpusie narzędzia. Przyczynami bicia ostrzy frezu mogą być:

- błędy ostrzenia,
- błędy wykonania gniazda w korpusie głowicy frezarskiej,
- błędy wykonania płytki skrawającej,
- błędy zamocowania,
- okresowo zmienna sztywność układu OUPN (obrabiarka–uchwyt–przedmiot obrabiany–narzędzie) w czasie pracy (zwłaszcza zmienna sztywność oprawy).

Błędy falistości są generowane głównie przez drgania występujące w układzie OUPN, natomiast chropowatość jest przede wszystkim wynikiem odwzorowania ostrza skrawającego w materiale oraz występowania drgań o małej amplitudzie. Drgania generowane podczas obróbki skrawaniem są bardzo ważne, ponieważ ich wartość wpływa bezpośrednio na strukturę geometryczną wytwarzanej powierzchni oraz zużycie ostrza skrawającego. Wartość drgań narzędzia jest również uzależniona od parametrów technologicznych procesu skrawania.

Drgania występujące w układzie N–P (narzędzie–przedmiot obrabiany) są zjawiskiem niepożądanym, które towarzyszy procesowi obróbki skrawaniem. Wpływają na spadek wydajności i opłacalności procesu wytwarzania oraz jakości produkcji. Powodują obniżenie żywotności podzespołów obrabiarki. Stanowią podstawowe utrudnienia w podnoszeniu wydajności obróbki poprzez skrawanie oraz w istotny sposób oddziałują na strukturę geometryczną obrabianej powierzchni [5–13, 16].

Istnieją dwa główne problemy praktyczne, z którymi spotykają się inżynierowie w procesie produkcyjnym. Pierwszym z nich jest określenie takich wartości parametrów procesu, które pozwolą uzyskać pożądaną jakość produktu (spełnić wymagania specyfikacji technicznych), a drugim – maksymalizacja wydajności systemu produkcyjnego z wykorzystaniem dostępnych zasobów. W obróbce skrawaniem wiele zjawisk jest złożonych i oddziałuje na siebie dużą liczbą czynników, co uniemożliwia osiągnięcie wysokiej wydajności procesu [3].

Pomiar składowych sił skrawania jest kluczową informacją wykorzystywaną do monitorowania obróbki, rozwiązywania problemów oraz sterowania procesem [14].

Na każdą powierzchnię roboczą ostrza biorącą udział w procesie skrawania działają siły, które są wypadkowymi nacisku (siła normalna) oraz tarcia (siła styczna). Całkowita siła skrawania  $F$  usytuowana przestrzennie powoduje oddzielenie nadmiaru od materiału obrabianego przez pokonanie jego sił spójności oraz oporów tarcia występujących pomiędzy narzędziem, materiałem i wiórem w określonych warunkach obróbki. Jest ona wypadkową trzech wektorów składowych działających wzdłuż linii wyznaczonych przez układ odniesienia O–P–N (obrabiarka–przedmiot obrabiany–narzędzie) [15].

Celem przeprowadzonych badań była analiza wpływu wybranych czynników obróbki towarzyszących procesowi frezowania czołowego na strukturę geometryczną powierzchni, pomiar sił występujących podczas procesu obróbki oraz rejestracja przemieszczeń względnych występujących w układzie N–P.

## Metodyka badań

Obecnie w przemyśle maszynowym większość operacji frezowania czołowego jest realizowana na obrabiarkach sterowanych numerycznie, ponieważ jest to najszerzej wykorzystywana wysoko wydajna metoda usuwania nadmiaru obróbkowego. Przeprowadzono badania wpływu wybranych parametrów skrawania na proces frezowania żeliwa szarego głowicą frezową wyposażoną w płytki z węglika spiekane. Próby skrawania realizowano ze zmiennym posuwem na ostrze  $f_z$ , a głębokość skrawania  $a_p$  i prędkość skrawania  $v_c$  pozostawały na stałym poziomie.

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (rys. 1), na którym w trakcie procesu skrawania powierzchni czołowej próbek rejestrowano wartość siły i momentów skrawania za pomocą wieloosiowego przetwornika siły i momentu MSC 10 firmy HBM (rys. 1b) oraz wartości przemieszczeń względnych w układzie N–P za pomocą interferometru laserowego

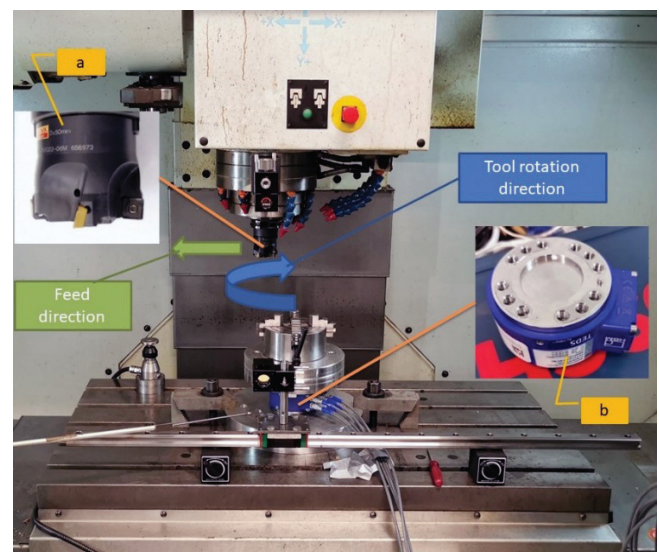


Fig. 1. Test stand: a – CoroMill 490-050Q22-08M head by Sandvik, b – MSC 10 multi-axis force and torque transducer by HBM  
Rys. 1. Stanowisko badawcze: a – głowica CoroMill 490-050Q22-08M firmy Sandvik, b – wieloosiowy przetwornik siły i momentu MSC 10 firmy HBM



Fig. 2. AVIA VMC 800 machining center  
Rys. 2. Centrum obróbkowe AVIA VMC 800

XL-80 firmy Renishaw. Stanowisko badawcze zainstalowano na sterowanym numerycznie pionowym centrum obróbkowym VMC 800 firmy AVIA (rys. 2).

Do badań zastosowano głowicę CoroMill 490-050Q22-08M z płytkami 490R-08T308M-KM 3330 firmy Sandvik Coromant (rys. 1a). Są to płytki prawe o szerokości 8 mm i grubości 3,3 mm. Korpus narzędzia umożliwia zamontowanie pięciu płytek skrawających. Dobór wartości promienia naroża zależy od głębokości skrawania oraz posuwu i wpływa na wykończenie powierzchni, łamanie wióra i wytrzymałość płytki. Do testów wybrano płytki z promieniem naroża  $r = 0,8$  mm z dodatkową krawędzią dogładzającą  $BSr = 1,2$  mm.

Do prób skrawania wytypowano żeliwo szare EN-GJL 250, ponieważ ten gatunek jest często stosowany w przemyśle.

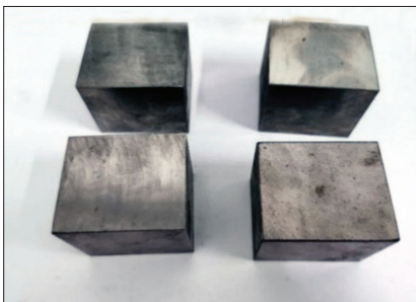


Fig. 3. Samples  
Rys. 3. Próbkki

TABLE I. List of cutting parameters  
TABLICA I. Zestawienie parametrów skrawania

Dane			
Nr próbki	$a_p$ [mm]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm/ostrze]
1	0,5	260	0,02
2	0,5	260	0,04
3	0,5	260	0,06
4	0,5	260	0,08
5	0,5	260	0,10
6	0,5	260	0,12
7	0,5	260	0,14
8	0,5	260	0,16
9	0,5	260	0,18

wany w przemyśle. Przygotowano próbki o wymiarach  $40 \times 40 \times 48$  mm (rys. 3). Próbkki były mocowane w uchwycie 4-szczękowym K72-125 firmy Axon. Zaletą takiej geometrii próbek jest możliwość jej mocowania zarówno w uchwycie czteroszczękowym, jak i w imadle.

Pierwszy etap badań polegał na analizie wpływu czynników obróbki na przebieg procesu frezowania żeliwa szarego. Podczas prób skrawania rejestrowano przemieszczenia względne w układzie N-P oraz składowe siły skrawania:  $F_x$  ( $F_f$ ),  $F_y$  ( $F_p$ ),  $F_z$  ( $F_c$ ) i momenty:  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Gdzie:  $F_f$  – składowa posuwowa,  $F_p$  – składowa odporowa,  $F_c$  – składowa obwodowa.

W tabl. I zestawiono parametry robocze stosowane podczas obróbki. Eksperyment został przeprowadzony bez użycia cieczy chłodząco-smarującej. Parametry obróbkowe dobrano zgodnie z danymi katalogowymi, biorąc pod uwagę obrabiany materiał. Próbkki obrobiono ze zmiennymi parametrami posuwu na ostrze  $f_z$ , z zachowaniem stałej głębokości skrawania  $a_p = 0,5$  mm oraz prędkości skrawania  $v_c = 260$  m/min.

## Wyniki badań

Kolejny etap badań polegał na analizie uzyskanych wyników.

Na wykresach (rys. 4 i 5) przedstawiono wartości *peak to peak* zarejestrowanych sygnałów sił i momentów dla wszystkich próbek. Na podstawie analizy rozkładu wszystkich sił składowych (rys. 4) zauważono, że największe wartości zmierzono dla składowej siły  $F_x$  (działającej wzdłuż osi X), a najmniejsze dla składowej  $F_z$ . Wynika to z tego, że w osi X występował ruch posuwowy, a kąt przystawienia narzędzia wynosił  $90^\circ$ . Powodowało to powstawanie siły promieniowej, co pokrywa się z wartością siły zarejestrowanej w osi Z. Można również zaobserwować, że wraz ze wzrostem wartości posuwu na ostrze wzrasta wartość wszystkich sił składowych i momentów (rys. 4 i 5) do wartości posuwu  $0,14$  mm/ostrze, gdzie zanotowano chwilowy spadek, a następnie wzrost dla wartości  $0,16$  i  $0,18$  mm/ostrze.

Kolejne wykresy (rys. 6 i 7) przedstawiają wartości składowej siły i momentów w funkcji czasu dla poszczególnych próbek. Przedstawiono przykładowe wyniki zarejestrowane podczas próby skrawania próbki nr 5. Można na nich zauważyć trzy charakterystyczne punkty. Pierwszy między  $1,6$  a  $5,2$  s, w którym powstaje kontakt narzędzia z materiałem i zaczyna się proces skrawania. Drugi, gdy narzędzie zaczyna opuszczać materiał około  $5,2$  s, i trzeci, gdy zakończony jest proces skrawania i następuje całkowite wyjście narzędzia z materiału około  $7,7$  s.

Na rys. 8 przedstawiono przykładowy wykres zarejestrowanego sygnału przemieszczeń względnych podczas wykonywania próby skrawania próbki nr 5 w układzie N-P w zależności od posuwu na ostrze. Można tu wyróżnić kilka charakterystycznych stref. W czasie od  $0$  do  $1,3$  s narzędzie dojeżdża do obrabianego materiału w osi X. Zagłębia się w materiał w przedziale czasowym od  $1,3$  s do  $1,6$  s. Następnie





Fig. 4. The difference between the maximum positive and the maximum negative force value: a) force in the X axis, b) force in the Y axis, c) force in the Z axis

Rys. 4. Różnica między maksymalną pozytywną i maksymalną negatywną wartością sił: a) siła w osi X, b) siła w osi Y, c) siła w osi Z

występuje pełne opisanie głowicy frezarskiej w przedziale od 1,6 s do 5,2 s. Narzędzie wychodzi z materiału między 5,2 s do 7,7 s, stopniowo zmniejsza się kąt opasania głowicy frezarskiej, następnie następuje odjazd w osi X od 7,7 s do 8,4 s.

Na rys. 9 przedstawiono wartość *peak to peak* zarejestrowanych sygnałów przemieszczeń w układzie N-P. Można zauważyć, że najmniejsze wartości zarejestrowano dla posuwu 0,02 mm/ostrze, i wynosiły one -2,007 mm dla minimalnego przemieszczenia oraz -1,965 mm dla maksymalnego przemieszczenia. Natomiast największe wartości zarejestrowano dla posuwu 0,18 mm/ostrze, gdzie minimalne przemieszczenie wynosiło -2,031 mm, a największe -1,934 mm. Wartości rosły wraz z posuwem.

Po przeprowadzeniu prób skrawania oraz pomiarze sił i przemieszczeń względnych poddano analizie

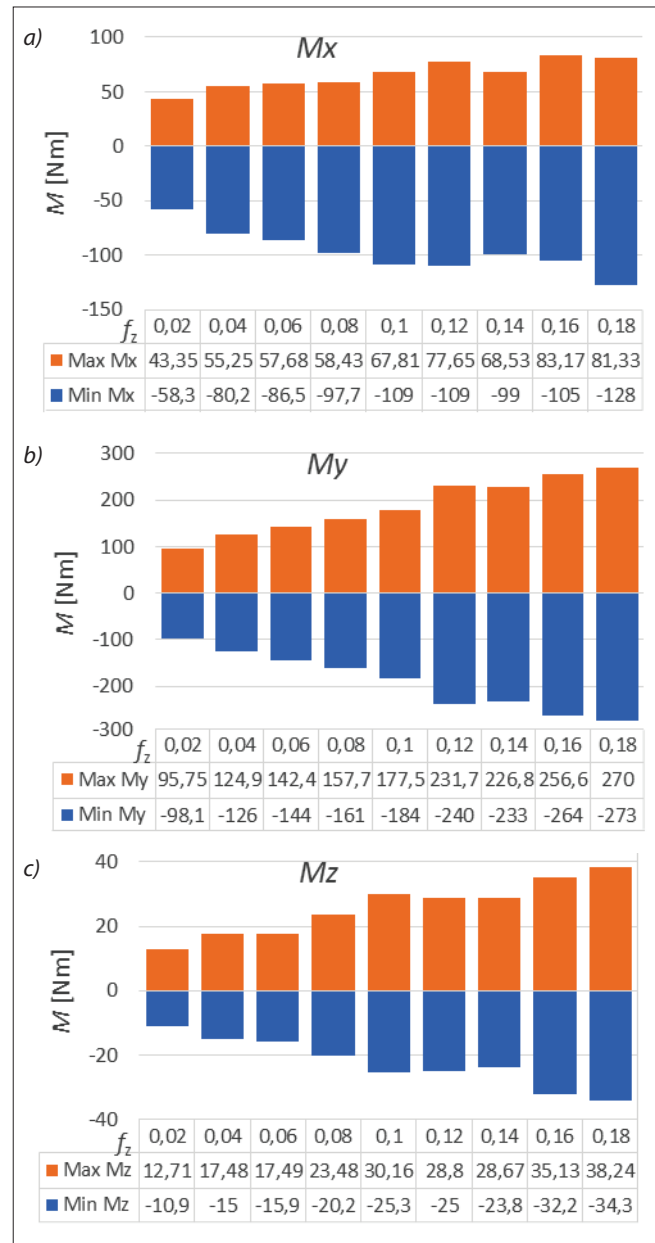


Fig. 5. The difference between the maximum positive and the maximum negative torque values: a) moment in the X axis, b) moment in the Y axis, c) moment in the Z axis

Rys. 5. Różnica między maksymalną pozytywną i maksymalną negatywną wartością momentów: a) moment w osi X, b) moment w osi Y, c) moment w osi Z

powierzchnię obrobionych próbek. Pomiar topografii powierzchni 3D przeprowadzono na profilometrze Talysurf CCI – Lite Non-contact 3D Profiler wyposażonym w oprogramowanie TalyMap Platinum. Zastosowano filtr gaussowski 0,8 mm. W tabl. II zestawiono obrazy izometryczne powierzchni zmierzonych próbek z żeliwa szarego EN-GJL 250.

W tabl. III pokazano wybrane parametry struktury geometrycznej obrobionych powierzchni próbek. Na podstawie danych z tabl. III wyciągnięto wnioski. Maksymalna wysokość piku profilu chropowatości  $R_p$  w pierwszej fazie wzrostu posuwu z wartości 0,02 mm/ostrze wykazywała trend wzrostowy, po czym nastąpił chwilowy spadek wartości parametru  $R_p$  do wartości 1,17  $\mu\text{m}$  przy posuwie 0,08 mm/ostrze. W zakresie posuwu 0,10÷0,14 mm/ostrze parametr  $R_p$  zaczął rosnąć aż do uzyskania maksymalnej wartości 1,85  $\mu\text{m}$

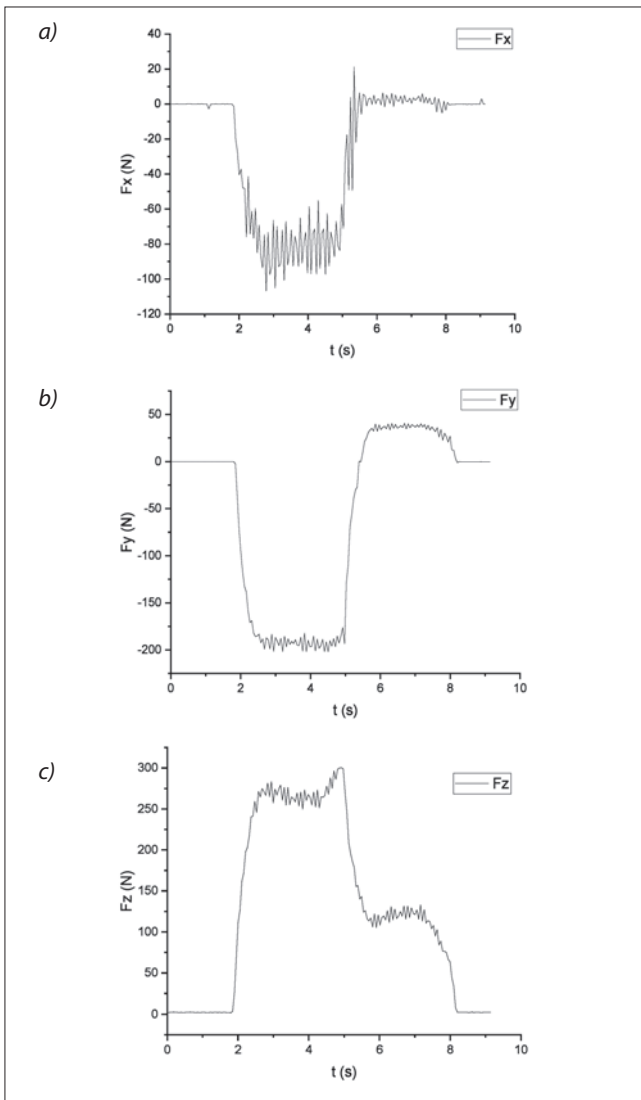


Fig. 6. Graphs of forces with the average of 1000 points. Machining parameters:  $v_c = 260$  m/min,  $f_z = 0.1$  mm/tooth: a) force in the X axis, b) force in the Y axis, c) force in the Z axis

Rys. 6. Wykresy sił ze średniej z 1000 punktów. Parametry obróbki:  $v_c = 260$  m/min,  $f_z = 0,1$  mm/ostrze: a) siła w osi X, b) siła w osi Y, c) siła w osi Z

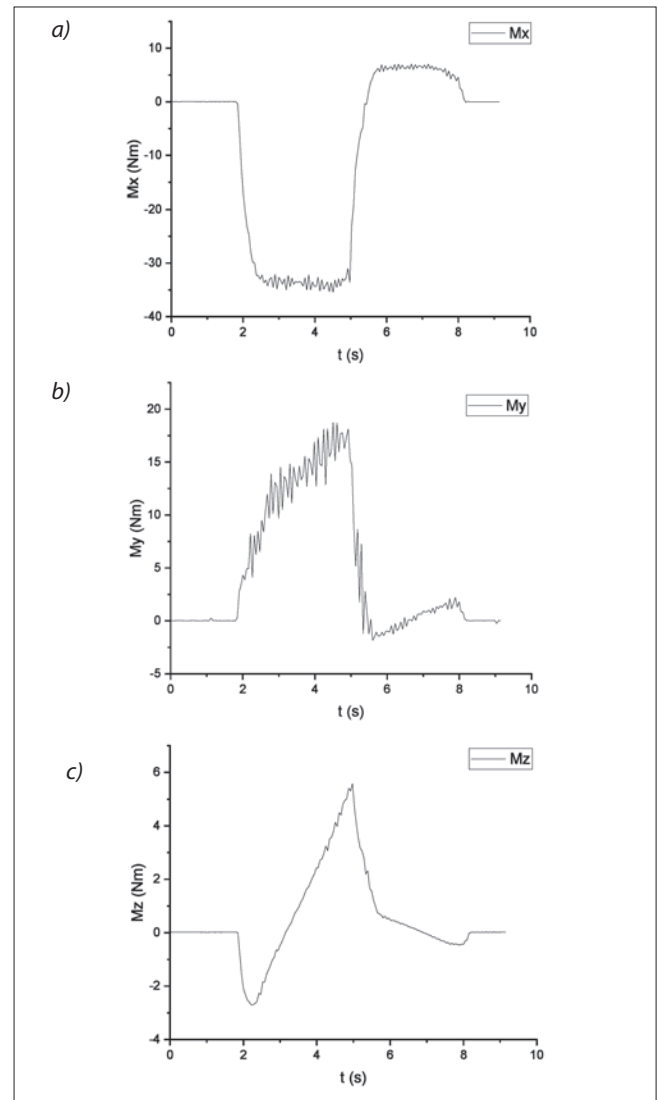


Fig. 7. Graphs of moments from the average of 1000 points. Machining parameters:  $v_c = 260$  m/min,  $f_z = 0.1$  mm/tooth: a) moment in the X axis, b) moment in the Y axis, c) moment in the Z axis

Rys. 7. Wykresy momentów ze średniej z 1000 punktów. Parametry obróbki:  $v_c = 260$  m/min,  $f_z = 0,1$  mm/ostrze: a) moment w osi X, b) moment w osi Y, c) moment w osi Z

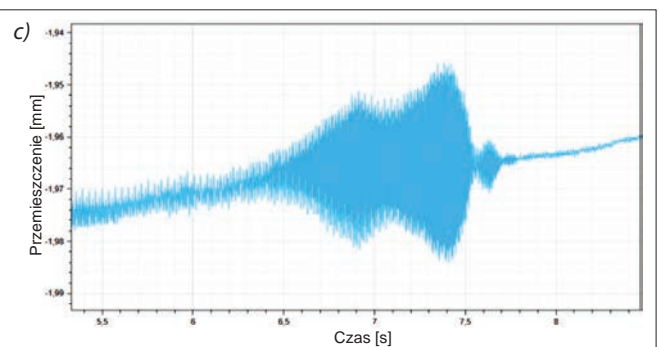
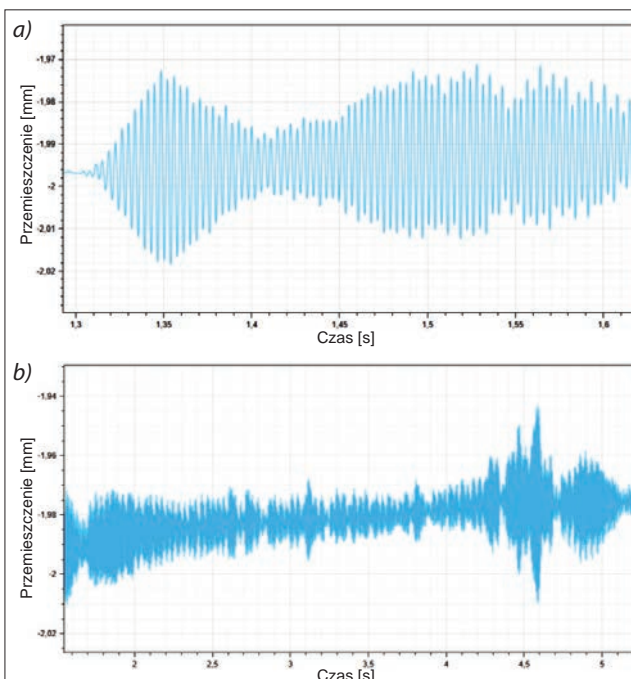


Fig. 8. Graph of relative displacements in the T-W system. Machining parameters:  $v_c = 260$  m/min,  $f_z = 0.1$  mm/tooth: a) insertion of the tool into the material, b) full wrapping of the head, c) exit of the tool from the material and departure in the X axis

Rys. 8. Wykres przemieszczeń względnych w układzie N-P. Parametry obróbki:  $v_c = 260$  m/min,  $f_z = 0,1$  mm/ostrze: a) zagłębienie narzędzia w materiale, b) pełne opasanie głowicy, c) wyjście narzędzia z materiału i odjazd w osi X

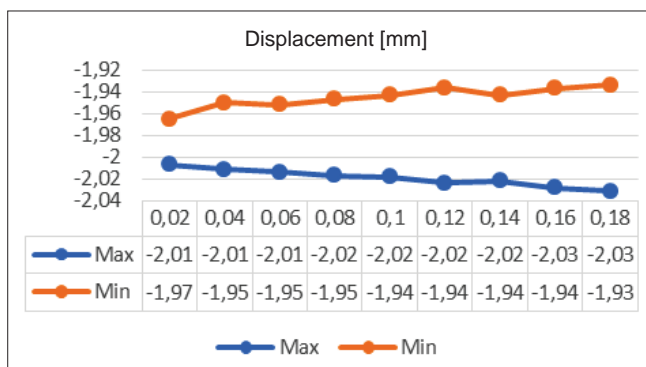


Fig. 9. Maximum and minimum values of displacement for various settings of the feed rate

Rys. 9. Maksymalne i minimalne wartości przemieszczenia dla różnych ustawień prędkości posuwowej

TABLE II. List of isometric images of the surface of samples made of gray cast iron EN-GJL 250, machined with variable feed per blade

TABLICA II. Zestawienie obrazów izometrycznych powierzchni próbek wykonanych z żeliwa szarego EN-GJL 250 obrabianych ze zmiennym posuwem na ostrze

Materiał: EN-GJL 250. Parametry skrawania: $v_c = 260$ m/min, $a_p = 0,5$ mm	
$f_z = 0,02$ mm/ostrze $f_n = 0,1$ mm/obr $f_t = 166$ mm/min	$f_z = 0,04$ mm/ostrze $f_n = 0,2$ mm/obr $f_t = 331$ mm/min
$f_z = 0,06$ mm/ostrze $f_n = 0,3$ mm/obr $f_t = 497$ mm/min	$f_z = 0,08$ mm/ostrze $f_n = 0,4$ mm/obr $f_t = 662$ mm/min
$f_z = 0,1$ mm/ostrze $f_n = 0,5$ mm/obr $f_t = 828$ mm/min	$f_z = 0,12$ mm/ostrze $f_n = 0,6$ mm/obr $f_t = 994$ mm/min
$f_z = 0,14$ mm/ostrze $f_n = 0,7$ mm/obr $f_t = 1159$ mm/min	$f_z = 0,16$ mm/ostrze $f_n = 0,8$ mm/obr $f_t = 1325$ mm/min
$f_z = 0,18$ mm/ostrze $f_n = 0,9$ mm/obr $f_t = 1490$ mm/min	

TABLE III. List of selected parameters of surface roughness of samples made of gray cast iron EN-GJL 250, machined with variable feed per blade

TABLICA III. Zestawienie wybranych parametrów chropowatości powierzchni próbek wykonanych z żeliwa szarego EN-GJL 250 obrabianych ze zmiennym posuwem na ostrze

Parametr	Posuw na ostrze $f_z$ [mm/ostrze]								
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
$R_p$ [ $\mu$ m]	0,91	1,41	1,76	1,17	1,42	1,78	1,85	1,00	1,25
$R_v$ [ $\mu$ m]	1,96	0,99	1,26	1,50	0,97	1,49	1,55	1,14	1,38
$R_z$ [ $\mu$ m]	2,87	2,41	3,02	2,67	2,39	3,28	3,40	2,14	2,63
$R_c$ [ $\mu$ m]	0,75	0,73	1,19	1,16	0,58	0,82	0,73	0,75	0,85
$R_t$ [ $\mu$ m]	2,87	2,41	3,02	2,67	2,39	3,28	3,40	2,14	2,63
$R_a$ [ $\mu$ m]	0,29	0,33	0,36	0,35	0,4	0,35	0,46	0,31	0,32
$R_q$ [ $\mu$ m]	0,39	0,42	0,45	0,44	0,47	0,46	0,57	0,39	0,41
$RSk$	-1,18	0,31	0,30	0,21	0,25	0,54	0,23	0,19	-0,31
$RKu$	6,21	3,33	3,19	3,08	2,42	4,07	2,76	2,95	3,64
$Rmr$ [%]	6,72	13,8	4,84	35,0	21,4	5,28	5,28	49,6	31,1
$Rdc$ [ $\mu$ m]	0,54	0,67	0,73	0,73	0,86	0,74	1,02	0,62	0,71
$Sq$ [ $\mu$ m]	0,44	0,45	0,53	0,49	0,64	0,79	0,75	0,82	0,76
$Ssk$	-0,33	0,22	-0,33	-0,02	0,18	0,22	-0,01	0,05	0,17
$Sku$	4,25	3,33	4,11	3,09	3,01	2,81	2,49	2,21	2,54
$Sp$ [ $\mu$ m]	3,68	2,98	3,37	1,40	2,03	2,56	1,88	2,06	2,07
$Sv$ [ $\mu$ m]	2,81	2,74	2,56	1,60	2,11	2,66	2,10	2,17	2,27
$Sz$ [ $\mu$ m]	6,49	5,73	5,93	3,01	4,14	5,22	3,98	4,23	4,34
$Sa$ [ $\mu$ m]	0,34	0,35	0,40	0,39	0,51	0,64	0,61	0,69	0,63

przy posuwie 0,14 mm. Następnie zaczął znów spadać do uzyskania drugiej najniższej wartości 1,00  $\mu$ m odnotowanej dla posuwu 0,16 mm/ostrze. Parametr maksymalnej głębokości doliny profilu chropowatości  $R_v$ , po początkowym spadku z wartości maksymalnej 1,96  $\mu$ m do 0,99  $\mu$ m dla posuwu 0,04 mm/ostrze, ponownie wzrósł do wartości 1,50  $\mu$ m dla posuwu 0,08 mm/ostrze, by spaść do poziomu minimalnego 0,97  $\mu$ m dla posuwu 0,1 mm/ostrze. Parametr maksymalnej głębokości doliny profilu chropowatości  $R_v$  w całym zakresie badanego posuwu na przemian zwiększał i zmniejszał swoją wartość w przedziale 0,97÷1,96  $\mu$ m. Parametr maksymalnej wysokości profilu chropowatości  $R_z$ , parametr średniej wysokości elementów profilu chropowatości  $R_c$  oraz parametr całkowitej wysokości profilu chropowatości  $R_t$ , podobnie jak  $R_v$ , w całym zakresie badanego posuwu na przemian zwiększały i zmniejszały wartość. Dla parametrów  $R_z$  oraz  $R_t$  zostały zarejestrowane takie same wartości, które zmieniały się w przedziale 2,14÷3,40  $\mu$ m. Najmniejszą wartość parametru  $R_z$  i  $R_t$  zmierzono dla posuwu 0,16 mm/ostrze, a największą – dla posuwu 0,14 mm/ostrze. Parametr  $R_c$  zmieniał się w przedziale 0,58÷1,19  $\mu$ m. Najmniejszą wartość parametru  $R_c$  zmierzono dla posuwu 0,10 mm/ostrze, a największą dla posuwu 0,06 mm/ostrze.

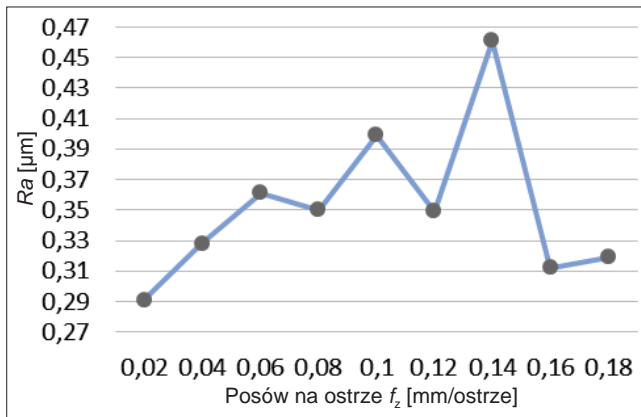


Fig. 10. Influence of feed per blade on the  $R_a$  parameter of surface roughness during face milling of gray cast iron EN-GJL 250

Rys. 10. Wpływ posuwu na ostrze na parametr  $R_a$  chropowatości powierzchni podczas frezowania czołowego żeliwa szarego EN-GJL 250

Analizując przebieg zmian parametru  $R_q$ , stwierdzono, że charakterystyka jego zmian jest taka sama jak parametru  $R_a$ . W początkowej fazie wzrostu posuwu na ostrze wartość  $R_q$  wzrasta z pewnymi wahaniami przy posuwie 0,08 oraz 0,12 mm/ostrze, gdzie zanotowano spadek, aż do wartości posuwu 0,14 mm/ostrze, aby następnie zanotować wyraźny spadek wartości  $R_q$  przy posuwie 0,16 i 0,18 mm/ostrze.

Na rys. 10 przedstawiono wyniki pomiarów parametru  $R_a$  w zależności od rosnącego posuwu na ostrze. Z analizy wpływu posuwu na ostrze na wartość parametru  $R_a$  wynika, że wraz ze wzrostem posuwu na ostrze wartość parametru  $R_a$  rosła z pewnymi wahaniami do wartości posuwu 0,08 oraz 0,12 mm/ostrze, gdy zanotowano spadek, aż do wartości posuwu 0,14 mm/ostrze, aby następnie zanotować wyraźny spadek wartości  $R_a$  przy posuwie 0,16 i 0,18 mm/ostrze. Użyte płytki były wyposażone w krawędź pomocniczą BS, która umożliwia dwukrotne zwiększenie posuwu bez pogorszenia chropowatości powierzchni. Jak można zauważyć na rys. 10, przy maksymalnych wartościach posuwu chropowatość zaczęła maleć.

## Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki procesu frezowania czołowego, podczas którego rejestrowano siły, momenty oraz przemieszczenia względne występujące w trakcie procesu skrawania. Zbadano wpływ prędkości posuwu na ostrze na badane parametry oraz chropowatość powierzchni.

Na chropowatość powierzchni frezowanych czołowo wpływają takie czynniki, jak stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie krawędzi ostrzy oraz przemieszczenia względne narzędzia i przedmiotu obrabianego. Wzrost prędkości posuwu miał niekorzystny wpływ na chropowatość powierzchni, do wartości 0,14 mm/ostrze powodował on wzrost chropowatości powierzchni  $R_a$  do 0,46  $\mu\text{m}$ . Następnie przy prędkości posuwu 0,16 i 0,18 mm/ostrze wartość chropowatości  $R_a$  malała do 0,31 i 0,32  $\mu\text{m}$ .

Posuw oddziałuje na strukturę geometryczną w sposób pośredni przez oddziaływanie na czynniki fizyczne, które towarzyszą procesowi skrawania.

Wraz ze wzrostem wartości posuwu na ostrze wzrasta wartość wszystkich sił składowych i momentów do wartości posuwu 0,14 mm/ostrze, gdzie zanotowano chwilowy spadek, a następnie wzrost dla wartości 0,16 i 0,18 mm/ostrze. Największe wartości sił składowych odnotowano dla składowej  $F_x$ , która dla minimalnych ustawień posuwu wynosiła 907 N, a dla maksymalnych ustawień wynosiła 2559 N. Najmniejsze wartości sił składowych odnotowano dla składowej  $F_z$ , która wynosiła dla najmniejszych ustawień posuwu 362,7 N, a dla największych 692,7 N.

Zarejestrowany sygnał przemieszczeń narzędzia względem przedmiotu obrabianego jest związany z obrotami narzędzia, liczbą jego ostrzy biorących udział w obróbce oraz wejściami płytek skrawających w materiał obrabiany i wyjściami z materiału. Na podstawie analizy przebiegu zapisanego sygnału można wyróżnić kilka charakterystycznych stref związanych z dojazdami narzędzia do przedmiotu obrabianego oraz etapami wejścia narzędzia w materiał obrabiany i jego wyjścia z materiału.

Wartości przemieszczeń rosły wraz ze wzrostem posuwu. Najmniejsze zarejestrowano dla posuwu 0,02 mm/ostrze, gdzie minimalne przemieszczenie wynosiło -2,007 mm, a maksymalne -1,965 mm. Różnica między tymi punktami wynosiła 0,042 mm. Natomiast największe wartości dla 0,18 mm/ostrze, gdzie minimalne przemieszczenie wynosiło -2,031 mm, a największe -1,934 mm. Różnica między tymi punktami wynosiła 0,097 mm.

Wzrost posuwu powodował wzrost drgań w układzie N-P, natomiast wzrost posuwu do maksymalnych wartości powodował prawie dwukrotny wzrost drgań.

Podczas projektowania procesów technologicznych należy zwrócić uwagę nie tylko na czynniki obróbki, takie jak posuw, lecz również na możliwe występowanie drgań w układzie N-P. Przy wykorzystaniu maksymalnych wartości tych czynników, ze względu na skrócenie czasu obróbki mogą występować drgania o wysokiej amplitudzie oraz siły, które mogą doprowadzić do pogorszenia jakości powierzchni wykonywanego detalu i utraty wymaganego wymiaru. W najgorszym wypadku może dojść do uszkodzenia narzędzia.

## LITERATURA

- [1] Tatar K., Gren P. "Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48, 3-4 (2008): 380-387, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.09.009>.
- [2] Franco P., Estrems M., Faura F. "A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48, 1 (2008): 112-123, <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.07.001>.
- [3] Benardos P.G., Vosniakos G.-C. "Predicting surface roughness in machining: a review". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 43, 8 (2003): 833-844, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2).



- [4] Shanshin I.K., Shagniev O.B., Burdakov S.F. "Adaptive self-excited vibrations suppression during milling". *Journal of Physics: Conference Series*. 1236, 1 (2019): 12051, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1236/1/012051>.
- [5] Skrzyniarz M., Nowakowski Ł., Miko E. "Development of a measurement method of relative displacements of the tool and the workpiece during turning". *Mechanik*. 8-9 (2015): 728/577-728/585, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.8-9.470>.
- [6] Miko E., Nowakowski Ł. "Analysis and Verification of Surface Roughness Constitution Model After Machining Process". *Procedia Engineering*. 39 (2012): 395-404, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.043>.
- [7] Heisel U., Milberg J. "Vibrations and Surface Generation in Slab Milling". *CIRP Annals*. 43, 1 (1994): 337-340, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62226-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62226-4).
- [8] Jang D.Y., Choi Y.-G., Kim H.-G., Hsiao A. "Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 36, 4 (1996): 453-464, <https://doi.org/10.1016/0890-6955%2895%2900074-7>.
- [9] Altintas Y., Engin S. "Generalized Modeling of Mechanics and Dynamics of Milling Cutters". *CIRP Annals*. 50, 1 (2001): 25-30, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62063-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62063-0).
- [10] Miko E. „Konstruowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrabianych narzędziami o zdefiniowanej stereometrii ostrzy”. Kielce: Wydaw. PŚ (2004).
- [11] Cieloszyk J. „Badanie wpływu wybranych czynników geometrycznych i kinematycznych na stan obrabianej powierzchni w procesie frezowania czołowego”. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny Politechniki Szczecińskiej Szczecin (1992).
- [12] Kyun Baek D., Jo Ko T., Sool Kim H., "A dynamic surface roughness model for face milling". *Precision Engineering*. 20, 3 (1997): 171-178, [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(97)00043-3).
- [13] Baek D.K., Ko T.J., Kim H.S., "Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 41, 3 (2001): 451-462, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00039-0).
- [14] Albrecht A., Park S.S., Altintas Y., Pritschow G., "High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 45, 9 (2005): 993-1008, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.028>.
- [15] Kuczmaszewski J., Pieśko P., Zawada-Michałowska M. "Analysis of cutting forces during in-cut and out-cut milling of EN AC-ALSi10Mg cast aluminum alloy". *Mechanik*. 91, 10 (2018): 871-873, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.148>.
- [16] Nowakowski Ł. „Wpływ wybranych czynników obróbki na strukturę geometryczną powierzchni frezowanych czołowo”. Rozprawa Doktorska. Kielce: Politechnika Świętokrzyska (2014). ■