

Dr inż. Marek KOŁODZIEJ,
dr inż. Paweł KAROLCZAK (Politechnika Wroclawska):

BADANIA SIŁ SKRAWANIA W TROCHOIDALNYM FREZOWANIU STALI 42CrMo4

Streszczenie

Obecnie jednym z kierunków, w jakim rozwija się technika kształtowania materiałów metodami ubytkowymi, jest obróbka na twardo (HM). Metoda ta w połączeniu z frezowaniem trochoidalnym może wyeliminować proces szlifowania, zapewniając wysoką dokładność kształtu i małą chropowatość obrabianej powierzchni. W artykule przytoczono wyniki badań sił skrawania w procesie frezowania trochoidalnego stali 42CrMo4 na twardo i porównano je z wynikami otrzymanymi dla frezowania metodą konwencjonalną. Do celów badawczych została wygenerowana ścieżka toru narzędzia z wykorzystaniem programu Edgcam, który ma wbudowany moduł do tworzenia obróbki trochoidalnej. Czynniki zmiennymi w badaniach były skok trochoidy oraz prędkość posuwu.

Słowa kluczowe: frezowanie, siły skrawania, skok trochoidy

THE STUDY OF CUTTING FORCES IN TROCHOIDAL MILLING OF 42CrMo4 STEEL

Abstract

Currently, one of the development directions of the technology of material forming with removal methods is hard machining (HM). This method, combined with trochoidal milling, may eliminate the grinding process, ensuring high shape accuracy and small machined surface roughness. The article presents the results of tests of cutting forces in the process of hard trochoidal milling of 42CrMo4 steel and compares them with results obtained for conventional milling. For the purposes of the study, a tool channel path was generated using the Edgcam program with an embedded module for creation of trochoidal machining. The variables in the tests were trochoid change and feed velocity.

Keywords: milling, cutting forces, trochoid change

BADANIA SIŁ SKRAWANIA W TROCHOIDALNYM FREZOWANIU STALI 42CrMo4

Marek KOŁODZIEJ¹, Paweł KAROLCZAK¹

1. WPROWADZENIE

Współczesne systemy typu CAM przeżywają w ostatnich latach duży rozwój. Programy CAM dostarczają technologom coraz to nowych strategii obróbkowych. Jedną z nich jest innowacyjna technologia obróbki nazywaną strategią trochoidalną.

Nazwa strategii frezowania trochoidalnego pochodzi od kształtu toru ruchu narzędzia - trochoidy. Jest to krzywa płaska nakreślona przez punkt leżący na promieniu okręgu toczącego się po stronie wewnętrznej (hipotrochoida, hipocykloida) lub zewnętrznej (epitrochoida, epicykloida) drugiego okręgu. Frezowanie trochoidalne można więc określić jako frezowanie kołowe z jednoczesnym ruchem narzędzia do przodu. Jest to metoda, która znajduje zastosowanie głównie do frezowania rowków, wgłębień oraz zamkniętych kieszeni. Obróbka z zastosowaniem ścieżki trochoidalnej umożliwia usuwanie w jednym przejściu dużej ilości materiału przy jednoczesnym zmniejszeniu kąta opasania narzędzia, co powoduje zmniejszenie siły skrawania oraz pozwala na zwiększenie głębokości skrawania a_p dla małej szerokości frezowania a_e [1].

Charakterystycznymi cechami frezowania trochoidalnego jest: cykliczność pracy narzędzia, możliwość frezowania rowków o szerokości do dwóch średnic freza, 50% czasu pracy narzędzia jest bez kontaktu ostrzy z przedmiotem obrabianym. Ponadto trajektoria trochoidalna powoduje zwiększenie płynności ruchu narzędzia, łagodną zmianę kierunku i wartości sił skrawania, co jest istotne w przypadku obróbki z dużymi prędkościami [2].

Głównymi zaletami frezowania trochoidalnego przemawiającymi za stosowaniem tej strategii obróbki jest [3]:

- możliwość stosowania znacznie wyższych parametrów skrawania,

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław

- otrzymywanie łagodnych zmian kierunku i wartości sił skrawania co jest to istotne dla trwałości narzędzi,
- mniejsze zużycie narzędzia. Praca odbywa się znacznie większą długością części roboczej narzędzia, które zużywa się przez to równomierniej i proporcjonalnie mniej w odniesieniu do objętości usuniętego materiału,
- duża wydajność obróbki,
- korzystne odprowadzenie wiórów,
- korzystne położenie wypadkowej siły skrawania, która występuje nie na końcu narzędzia, a bliżej miejsca jego mocowania (ze względu na duże a_p),
- korzystniejsza charakterystyka drgań układu narzędzie–przedmiot obrabiany,
- dogodny ruch narzędzia w narożach i w miejscach zwiększonego kąta opasania narzędzia,
- możliwość wykonywania szerokości rowka nawet do dwóch średnic freza.

2. CEL ORAZ METODYKA BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu parametrów frezowania trochoidalnego na składowe całkowitej siły skrawania w warunkach skrawania na twardo stali hartowanej. Badania zostały przeprowadzone na próbce ze stali 42CrMo4, w której frezowano rowki o szerokości 22,4 mm konwencjonalnie oraz z zastosowaniem obróbki trochoidalnej. Frezowanie konwencjonalne przeprowadzono z parametrami skrawania: prędkość skrawania $v_c=54$ m/min, głębokość skrawania $a_p=1,5$ i 3 mm, prędkość posuwu $v_f=373$ mm/min, szerokość skrawania $a_e=16$ mm. Frezowanie trochoidalne wykonano z parametrami skrawania: prędkość skrawania $v_c=281$ m/min, głębokość skrawania $a_p=20$ mm, prędkość posuwu $v_f=960; 1070; 1550$ mm/min, szerokość skrawania $a_e=1,27; 2,40; 3,31$ mm, skok trochoidy $w=2,5; 5; 7,5$ % co odpowiada odpowiednio skokowi trochoidy $w=0,4; 0,8; 1,2$ mm. Tor ruchu narzędzia został wygenerowany z wykorzystaniem programu CAM. Obróbkę frezowania przeprowadzono na centrum obróbkowym HASS 1P. Głębokość frezowania uwarunkowana była zapasem mocy obrabiarki i maksymalną mocą skrawania P_c , która to nie mogła być większa niż nominalna moc napędu wrzeciona, która wynosiła $P_k=5,6$ kW. Do badań składowych sił skrawania F_c , F_f i F_p wykorzystano siłomierz piezoelektryczny firmy Kistler model 9257A.

2.1. WARUNKI PROWADZENIA BADAŃ

W badaniach wykorzystano stal do ulepszenia cieplnego i hartowania o oznaczeniu EN: 42CrMo4 (tabela 1). Jest to stal niespawalna, łatwa w obróbce mechanicznej i cieplnej. Próbkę przygotowano w kształcie prostopadłościanu o wymiarach: 100x150x40mm (rys.1).

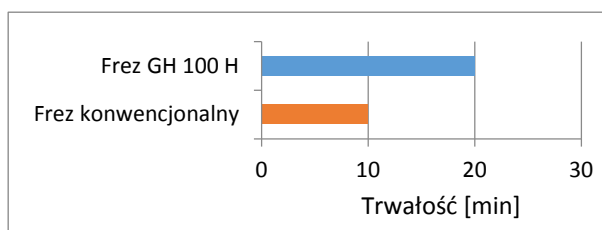
Tabela 1 Skład chemiczny stali 42CrMo4 wg normy EN 10083

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Co	Cu
0,38-0,45	0,4-0,7	0,17-0,37	max 0,035	max 0,035	0,8-1,2	max 0,3	0,15-0,25	max 0,2	max 0,05	-	max 0,25

Próbkę poddano obróbce cieplnej, której celem było uzyskanie twardości w zakresie od 50 do 62 HRC. Wartość maksymalna twardości uwarunkowana jest wytrzymałością frezu, która była określona przez producenta narzędzia. Po przeanalizowaniu wykresów hartowności ustalono, że w celu uzyskania odpowiedniej twardości należy wygrzewać próbkę w temperaturze 820°C przez okres 30 minut a następnie chłodzić w wodzie. Do wygrzewania materiału wykorzystano piec indukcyjny typu FCF 12 SHM firmy Czylok.



Rys.1. Widok próbki ze stali 42CrMo4 wykorzystanej w badaniach



Rys.2. Porównanie trwałości freza Guhring GH 100H i freza konwencjonalnego do obróbki wykończeniowej podczas frezowania stali narzędziowej o twardości 57HRC

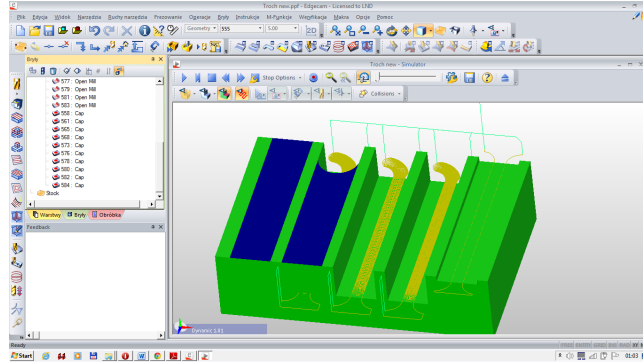
Po wstępnej obróbce cieplnej splanowano powierzchnię próbki, a następnie przeprowadzono pomiar twardości metodą Vickersa, zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:1999, na urządzeniu firmy Zwick typ 3212.01. Otrzymano wartość 720 HV, którą przeliczono na twardość w skali Rockwella i uzyskano wartość 59 HRC.

Po analizie rynku narzędziowego do badań został wybrany frez trzpieniowy z węgla spiekane firmy GUHRING z serii FINISH-TECH 62 GH100 H - numer katalogowy 3715. Jest to pełnowęglkowy, sześciostrzowy frez o średnicy $\varnothing 16$ milimetrów pokryty powłoką typu „FIRE”. Wybrany frez jest narzędziem dedykowanym do frezowania materiałów utwardzonych do twardości 62 HRC. Narzędzia z tą powłoką doskonale nadają się do obróbki „na sucho” (rys. 2).

Bardzo ważnym etapem badań było zaprogramowanie ścieżki dla trochoidalnego ruchu narzędzia. W tym celu zaprojektowano model 3D w programie CAD 3D Inventor. W próbce wykonano pięć kieszeni o szerokości 22,4 mm, trzy z nich o głębokości 20mm, pozostałe dwie o głębokości 3 mm każda.

Kolejnym etapem było zaprogramowanie ścieżki ruchu narzędzia dla obróbki konwencjonalnej i trochoidalnej za pomocą programu typu CAM. Do tego celu użyto programu EDGE CAM (rys. 3). Każdą z trzech głębszych kieszeni wykonano w jednym przejściu z określonym skokiem trochoidy. Jeżeli chodzi o rowki o głębokości 3 mm zaprogramowano je w dwóch przejściach po 1,5mm.

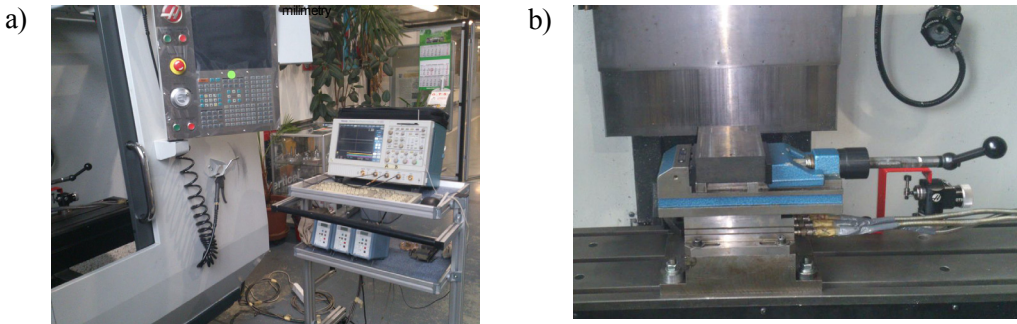
Podczas programowania kształtu trochoidy należało określić jej skok. Skok trochoidy w ma bezpośredni wpływ na wartość szerokości skrawania a_e . Z tego powodu nie należy stosować większego skoku trochoidy niż ok. 7 -10% średnicy freza D . W badaniach skok trochoidy był czynnikiem zmiennym, dlatego przejścia frezem wykonano ze skokiem równym $w=2,5\%$, $w=5\%$, $w=7,5\%$.



Rys.3. Okno symulacji ścieżki toru narzędzia wygenerowane za pomocą programu EDGE CAM

W celu sprawdzenia wygenerowanej ścieżki wykorzystano w tym celu program CIMCO Edit v6.0. Graficzny symulator frezowania 3D obsługuje krokową, płynną oraz wsteczną symulację kodu NC co pozwoliło szczegółowo przeanalizować ruch narzędzia i wyeliminować ewentualne kolizje narzędzia z przedmiotem obrabianym.

Do pomiaru składowych sił skrawania F_c , F_f i F_p wykorzystano siłomierz piezoelektryczny firmy Kistler model 9257A (rys. 4). Jest to trójskładowy piezoelektryczny siłomierz, który znajduje uniwersalne zastosowanie do pomiaru sił w procesie obróbki skrawaniem (toczeniu, frezowaniu). Sygnał z siłomierza przekazywano w trybie on-line przez wzmacniacz Kistler 5011 do komputera stacjonarnego. Wszystkie zarejestrowane dane zapisano do pliku źródłowego.

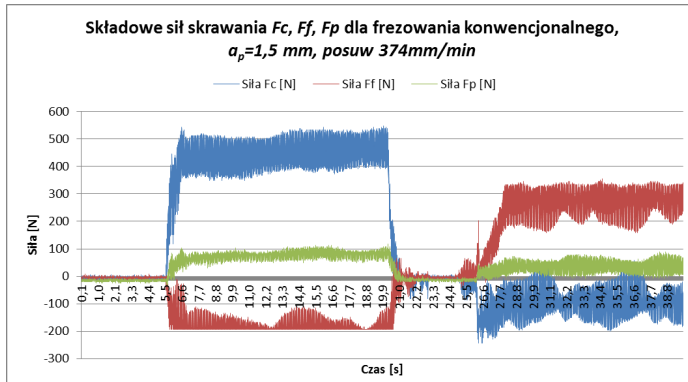


Rys.4. Stanowisko do pomiaru składowych sił skrawania: a) widok wzmacniaczy i rejestratora przebiegów sił skrawania, b) zamocowany na stole frezarki siłomierz wraz z obrabianą próbką

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. WPŁYW FREZOWANIA TROCHOIDALNEGO NA SKŁADOWE SIŁY SKRAWANIA

W celu późniejszego porównania wyników badania rozpoczęto od frezowania konwencjonalnego. Na podstawie tych badań otrzymano wykres przedstawiający przebiegi składowych siły skrawania (rys.5): F_c (siła skrawania), F_f (siła posuwowa), F_p (siła odporna).



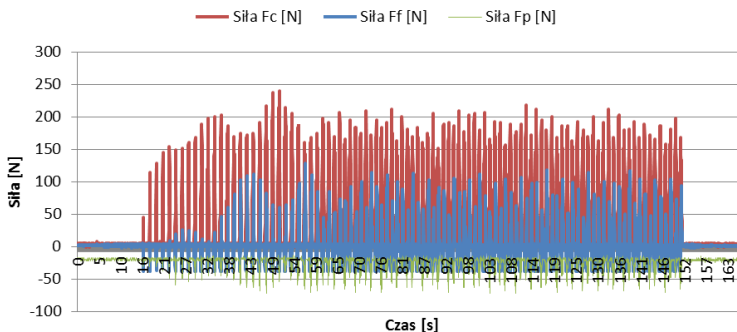
Rys.5. Wykres przedstawiający wartości składowych sił skrawania F_c , F_f , F_p dla frezowania konwencjonalnego, głębokość skrawania $a_p=1,5$ mm, posuw na ostrze $f_z=0,058$ [mm/ostrze], prędkość skrawania $v_c=54$ [m/min]

Przy frezowaniu konwencjonalnym największe wartości sił dla poszczególnych składowych otrzymano: $F_c=548$ N, $F_f=356$ N natomiast $F_p=118$ N.

Na rysunku można zauważyć, że maksymalne siły, czyli te powyżej 500 N utrzymują się do około 20 sekundy ruchu roboczego freza. Przez pierwsze 20 sekund frez skrawa całą swoją szerokością $D=16$ mm, czyli $a_e=D$ i jest to typowe dla frezowania rowków metodą konwencjonalną. Gdy siła skrawania osiąga swoje maksimum siła posuwowa F_f osiąga minimalne wartości rzędu $F_f=-194$ N, gdzie znak minus oznacza że siła jest przeciwnie skierowana do założonego.

W drugim przejściu freza można zauważyć, że siły mają niższe wartości. Jedyne wartości siły F_p są podobne do tych z pierwszych 20 sekund frezowania. Wynika to z założeń geometrycznych, w których frezowany rowek ma 22,4 mm szerokości. Przy średnicy freza 16mm wykonano drugie przejście, którego szerokość wynosiła $a_e=6,4$ mm co stanowiło 29% szerokości całego rowka.

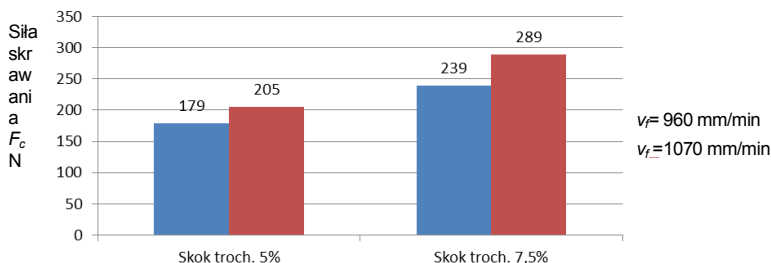
Kolejne badania dotyczyły frezowania trochoidalnego z ustalonymi parametrami skrawania i ustalonym skokiem trochoidy. Na rysunku 6 pokazano przykładowy przebieg składowych sił skrawania dla frezowania ze skokiem trochoidy $w=7,5\%$.



Rys.6. Wykres przebiegów składowych siły skrawania F_c , F_f , F_p dla frezowania trochoidalnego z głębokością skrawania $a_p=20\text{mm}$, posuw na ostrze $f_z=0,1$ [mm/ostrze], prędkość skrawania $v_c=281$ [m/min], skok trochoidy $w=7,5\%$

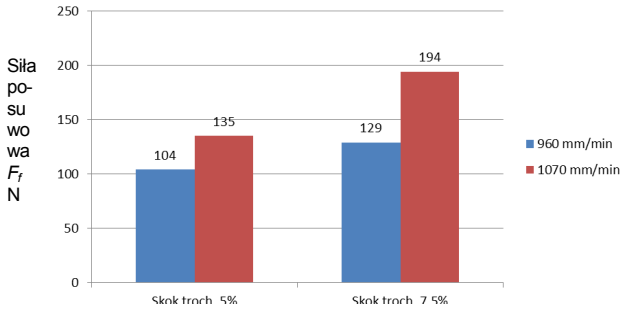
Analizując otrzymane wartości z przeprowadzonych doświadczeń można zaobserwować kilka istotnych zależności we frezowaniu trochoidalnym. Dla stałego skoku trochoidy wynoszącego $w=2,5\%$ i zmiennego posuwu z $v_f=960$ do $v_f=1550\text{mm/min}$ zaobserwowano wzrost maksymalnej siły F_c do wartości 216N. Jest to wzrost na poziomie około 40%. O około 45% zwiększała się również wartość siły F_f z 70N do 125N. Jedyne siła F_p dla obu wartości posuwu pozostała na zbliżonym poziomie, a nawet nieco zmalała o około 20%. Podobnie zachowywały się siły dla skoku trochoidy wynoszącym 5%. Zwiększenie posuwu do wartości $v_f=1070\text{mm/min}$ spowodowało zwiększenie maksymalnej składowej siły skrawania F_c do wartości 179N, co dało wzrost na poziomie około 13%. O około 23% zwiększała się również wartość składowej siły F_f ze 104N do 135N. Siła odporowa F_p zmalała o około 39% z 54N do 33N. Tą samą zależność zaobserwowano podczas frezowania ze skokiem trochoidy wynoszącym 7,5%. Zwiększenie posuwu do wartości $v_f=1070\text{mm/min}$ spowodowało wzrost maksymalnej siły F_c do wartości 289N, co dało wzrost na poziomie około 17%. O 33% zwiększała się również wartość składowej siły F_f ze 129N do wartości 194N. Jedyne składowa siła F_p dla obu wartości posuwu pozostała na zbliżonym poziomie.

Na rysunku 7 i 8 zostały zamieszczone wykresy, które pokazują jaki jest wpływ posuwu na składowe siły skrawania F_c i F_f dla zadanego skoku trochoidy wynoszącego 5 i 7,5% w zależności od prędkości posuwu v_f .



Rys.7. Zależność składowej siły F_c dla skoku trochoidy 5% i 7,5% w zależności od prędkości posuwu $v_f=960\text{mm/min}$ i $v_f=1070\text{mm/min}$

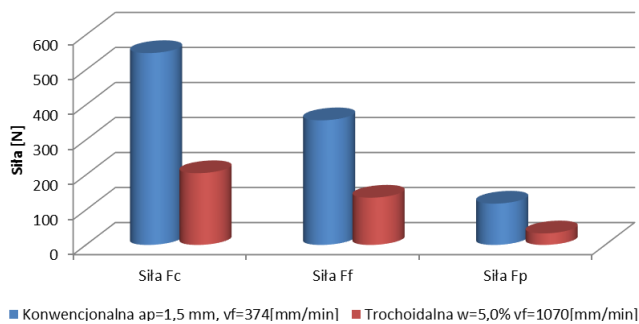
Na wykresach można zauważyć, że wraz ze zwiększeniem skoku trochoidy z 5% do 7,5% i tym samym posuwie, składowa siły skrawania F_c rośnie. Dla posuwu $v_f=960\text{mm/min}$ przy $w=5\%$ wartość siły wyniosła $F_c=179\text{N}$, natomiast przy $w=7,5\%$ wzrosła do wartości $F_c=239\text{N}$. Natomiast dla posuwu $v_f=1070\text{mm/min}$, wartość siły rośnie z $F_c=205\text{N}$ do $F_c=289\text{N}$, dla skoku trochoidy odpowiednio $w=5\%$ i $w=7,5\%$.



Rys.8. Zależność składowej siły F_f dla skoku trochoidy 5% i 7,5% w zależności od prędkości posuwu $v_f=960\text{mm/min}$ i $v_f=1070\text{mm/min}$

W przypadku siły posuwowej można zauważyć podobną zależność. Wraz ze zwiększeniem skoku trochoidy z 5% do 7,5% przy tej samej prędkości posuwu, składowa siła posuwowej F_f rośnie. Dla posuwu $v_f=960\text{mm/min}$ przy $w=5\%$ siła posuwowa $F_f=104\text{N}$ natomiast przy $w=7,5\%$, $F_f=129\text{N}$. Natomiast dla posuwu $v_f=1070\text{mm/min}$, siła rośnie z $F_f=135\text{N}$ do $F_f=194\text{N}$, dla skoku trochoidy odpowiednio $w=5\%$ i $w=7,5\%$.

Porównując wyniki uzyskiwanych czasów stwierdzono, że czas obróbki trochoidalnej dla parametrów skrawania $w=5,0\%$ i $v_f=1070[\text{mm/min}]$ jest taki sam, jak czas potrzebny na wykonanie rowka dla obróbki konwencjonalnej przy parametrach $a_p=1,5\text{ mm}$ i $v_f=374[\text{mm/min}]$. Dlatego na rys. 9 porównano poszczególne składowe siły skrawania, które otrzymano podczas obróbki obiema metodami dla podanych parametrów.



Rys. 9 Wartości składowych sił skrawania F_c , F_f i F_p przy odpowiadającym sobie czasie obróbki metodą tradycyjną oraz trochoidalną

Porównując składowe siły skrawania dla obu obróbek, otrzymano blisko 3-krotne zmniejszenie się wartości składowych siły skrawania podczas frezowania trochoidalnego, dla zbliżonego czasu obróbki wynoszącego 9 minut i 43 sekundy.

4. PODSUMOWANIE

Badania oraz analiza wyników pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zwiększenie skoku trochoidy zwiększa proporcjonalne siły skrawania.
2. Zwiększenie posuwu przy stałej wartości w (skoku trochoidy) zwiększa składowe siły skrawania:
 - przy skoku trochoidy $w=2,5\%$ zwiększenie posuwu do $v_f=1550\text{mm/min}$ powoduje wzrost maksymalnej siły F_c o 40%. O około 45% zwiększyła się również wartość siły F_f
 - przy skoku trochoidy $w=5\%$ zwiększenie prędkości posuwu do $v_f=1070\text{mm/min}$ powoduje wzrost maksymalnej siły F_c o około 13%. O około 23% zwiększała się również wartość siły F_f
 - przy skoku trochoidy $w=7,5\%$ zwiększenie posuwu do $v_f=1070\text{mm/min}$ powoduje wzrost maksymalnej siły F_c o około 17%. O około 33% zwiększała się również wartość siły F_f .
3. Porównując obróbkę konwencjonalną do trochoidalnej, dla zbliżonych czasów obróbki tj. 9 minut 43 sekundy otrzymano blisko 3-krotny spadek wartości składowych siły skrawania F_c , F_f i F_p na korzyść frezowania trochoidalnego.

LITERATURA

- [1] CICHOSZ P. *Obróbka skrawaniem. Wysoka produktywność*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007
- [2] SANDVIK Poradnik obróbki skrawaniem, 2012
- [3] Zalewski A. *Obróbka trochoidalna na frezarkach CNC*. Mechanik Nr 4/2007