

Dr inż. Krzysztof FILIPOWICZ (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny):

PROJEKTOWANIE NARZĘDZIA GENERUJĄCEGO OKREŚLONY UKŁAD SIŁ SKRAWANIA

Streszczenie

Omówiono opracowaną i zweryfikowaną metodologię projektowania narzędzia specjalnego do obróbki przedmiotów podatnych. Przedstawiono narzędzie do obróbki kół pojazdów szynowych z wkładkami elastycznymi. Takie koła wykazują znaczną podatność w kierunku równoległym do osi zestawu kołowego, co uwzględniono przy ustalaniu wymagań dotyczących układu sił. Silnie niesymetryczny kształt obrabianego profilu nie pozwala na zastosowanie układu ostrzy równoważących siłę skrawania, dlatego zachodzi potrzeba dokładniejszej analizy obciążenia przedmiotu obrabianego siłami skrawania. Do tego celu wykorzystano model MES obrabianego koła.

***Słowa kluczowe:** siły skrawania, metoda elementów skończonych, narzędzia specjalne*

PROJECT OF CUTING TOOL THAT GENERATES SPECIFIC CUTING FORCES SYSTEM

Abstract

Presenting developed and verified method of projecting special cutting tool for machining of flexible objects. Presented tool was made for machining resilient wheels of railway vehicles. Such wheels show large flexibility in direction parallel to axis of a wheelset, what was taken into account during establishing requirements for cutting forces system. Strongly asymmetric shape of machined profile doesn't allow to use symmetrical cutting edges set that balances generated cutting forces so there is a need of more precise analysis of loads on machined wheel. For this purpose a FEM model was used.

***Keywords:** Cutting forces, finite element method, special cutting tools*

PROJEKTOWANIE NARZĘDZIA GENERUJĄCEGO OKREŚLONY UKŁAD SIŁ SKRAWANIA

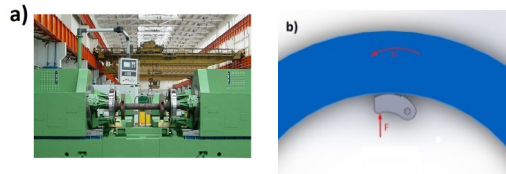
Krzysztof FILIPOWICZ¹

1. WSTĘP

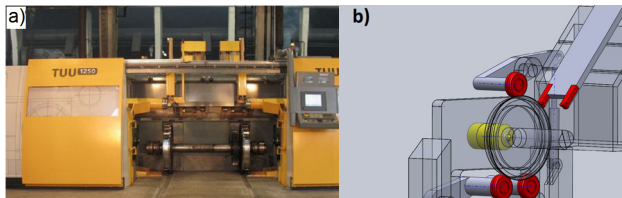
Prezentowana praca jest częścią badań prowadzonych w celu umożliwienia obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym. Zestawy kołowe z wkładkami elastycznymi są wykorzystywane w pojazdach szynowych przeznaczonych do ruchu miejskiego. W celu zmniejszenia drgań oraz hałasu wywołanych toceniem się kół po torach, zestawy wyposażone są w elementy wibroizolujące w postaci wkładek elastomerowych umieszczonych pomiędzy piastami, a obręczami kół. Rozwiązanie takie jest stosowane z powodzeniem w różnych typach pojazdów szynowych w wielu krajach, jednakże jego mankamentem jest utrudniona obróbka zestawów kołowych wykonywana podczas regeneracji zarówno zestawów demontowanych z wózka pojazdu jak i tych, które nie są rozmontowywane [10].

Urządzeniami technologicznymi przeznaczonymi do obróbki profili jezdnych zestawów kół pojazdów szynowych są tokarki kołowe [6]. Do niedawna obrabiarki te wykorzystywały do napędzania przedmiotów obrabianych zabieraki krzywkowe opierające się o wewnętrzne powierzchnie obręczy kół toczzonego zestawu (Rys. 1.1.). Taki sposób przekazywania ruchu przedmiotowi obrabianemu powoduje ryzyko uszkodzenia obręczy kół przez zabieraki oraz nie jest możliwy do zastosowania w przypadku zestawów z wkładkami elastycznymi. Tokarki kołowe z napędem ciernym przekazują ruch obrotowy przedmiotowi obrabianemu za pomocą rolek napędzających, które są dociskane do profili jezdnych kół obrabianego zestawu i siłami tarcia nadają główny ruch skrawania (Rys 1.2.).

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Instytut Technologii Mechanicznej, al. Piastów 19; 70-310 Szczecin



Rys 1.1. Obróbka zestawu kołowego: a) tokarka kołowa; b) zasada działania zabieraka krzywkowego



Rys. 1.2. Tokarka kołowa z napędem ciernym: a) tokarka kołowa b) zasada działania mechanizmu mocująco-napędzającego

Taki sposób napędu nie wymaga dostępu do wewnętrznej strony obręczy obrabianych kół. Postać konstrukcyjna zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi sprzyja stosowaniu takiego sposobu zabierania umożliwiając równocześnie wykorzystanie tokarek kołowych z napędem ciernym do obróbki tych zestawów. Jednakże siły z jakimi rolki napędzające są dociskane do obręczy zestawów powodują niepożądane efekty pojawiające się w procesie obróbki [5].

W związku z powyższym zaszła potrzeba zbadania problemów technologicznych występujących podczas obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym. Zaowocowało to opracowaniem technologii frezowania narzędziem o specyficznym układzie ostrzy zaprojektowanym w celu niwelowania efektów niskiej sztywności przedmiotu obrabianego.

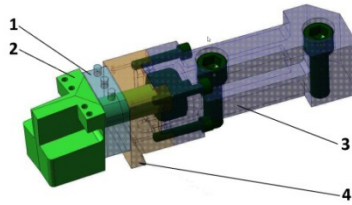
2. MODELOWANIE PROCESU OBRÓBK ZESTAWU KOŁOWEGO Z WKŁADKAMI ELASTYCZNYMI METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH.

W celu identyfikacji problemów powstających podczas obróbki zestawów kołowych z wysokimi parametrami został stworzony model obliczeniowy obrabianego koła w metodzie elementów skończonych. Położenie rolek napędzających oraz noża skrawającego wynika z geometrii układu OUPN obrabiarki TUU 1250. Model koła zawierał wkładki elastyczne między piastą koła a obręczą, które rozlokowano na obwodzie koła zgodnie z jego konstrukcją.

Właściwości mechaniczne stali, z których wykonane są obręcze oraz piasty pojazdów szynowych są określone przez polskie normy i parametry te zostały przyjęte jako dane materiałowe w procesie modelowania. Właściwości materiałowe wkładek gu-

mowych nie są określone w normach i dlatego parametry charakteryzujące te własności zostały zmierzone w próbach wytrzymałościowych.

Kolejnym etapem pracy było określenie wartości sił skrawania podczas obróbki zestawów kół kolejowych z różnymi parametrami.



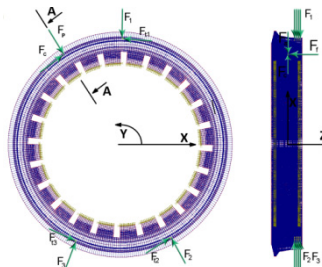
Rys. 2.1. Rysunek oprawki wyposażonej w siłomierz (1-siłomierz; 2-część robocza z gniazdami dla 2 płytek; 3- część chwytowa; 4- łącznik z gniazdem do mocowania części roboczej i siłomierza)

Wykorzystując narzędzie specjalne oraz niezbędną aparaturę zmierzone zostały siły dla różnych parametrów skrawania stosowanych przy obróbce kół kolejowych na tokarkach kołowych z napędem ciernym. Określono maksymalne parametry skrawania, przy których proces był jeszcze stabilny. Ostatecznie zmierzone zostały wartości siły skrawania przy obróbce z głębokością 5 mm i posuwem 1,5 mm/obrót. Wartości te zostały użyte jako obciążenie zewnętrzne w modelu MES obrabianego koła.

Podjęto zatem decyzję o weryfikacji otrzymanych wartości obliczeniowych poprzez pomiar rzeczywistych przemieszczeń w trakcie procesu skrawania. Pomiary te potwierdziły poprawność wyników przeprowadzonych analiz.

Badania analityczne polegały na symulacji usuwania nadmiaru z obręczy koła. Obliczenia przeprowadzono w 21 przypadkach odpowiadających kolejnym położeniom noża skrawającego podczas obróbki, przy czym modelując efekt usuwania nadmiaru w kolejnych procesach obliczeniowych usuwano warstwę elementów skończonych modelujących usunięty materiał.

Wyniki obliczeń składowych przemieszczenia w punkcie przyłożenia siły skrawania przedstawiono na rysunku 2.3.



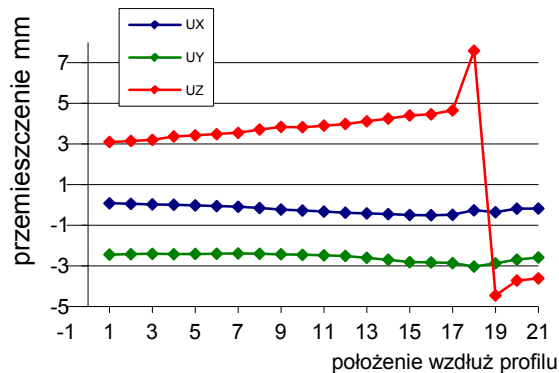
Rys. 2.2. Model obliczeniowy MES oraz schemat obciążenia koła obrabianego.

Wartości składowych przemieszczenia węzła, do którego (modelowo) przyłożono siłę skrawania osiągają wartość kilku milimetrów – maksymalnie $U_z = 7,815$ mm.

Składowe przemieszczenia w kierunku promieniowym jak i obwodowym są znacznie mniejsze, a ich wartości są również zależne od składowej osiowej przemieszczenia.

Wyznaczone metodą elementów skończonych wartości składowych przemieszczeń okazały się tak duże, że poddano w wątpliwość poprawność przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych.

W ślad za obliczeniami oraz ich weryfikacją doświadczalną podjęte zostały prace mające na celu ograniczenie przemieszczenia osiowego obręczy obrabianego koła. Opracowano różne koncepcje podparcia, które zostały przeanalizowane z uwagi na możliwość ich zastosowania na obrabiarce oraz skuteczność tego podparcia w procesie obróbki.



Rys 2.3. Obliczone wartości składowych przemieszczenia w węzle obciążonym siłą skrawania (z zamodelowaniem efektu usuwania nadkładu podczas skrawania)

Należy tu zaznaczyć, że mimo obiecujących wyników obliczeń modelu MES zastosowania różnych wariantów podtrzymki podczas obróbki z głębokością 4 mm mocowanie jej nie wytrzymało działających sił. Wynika z tego wniosek, że mimo zastosowania podtrzymki konieczne było zastosowanie innych (znacznie mniejszych) parametrów obróbki. Ponadto zastosowanie podtrzymki podczas obróbki zestawów kołowych powoduje dodatkowe trudności w obsłudze obrabiarce.

3. OPRACOWANIE ZAŁOŻEŃ KONSTRUKCYJNYCH PROTOTYPU NARZĘDZIA FREZARSKIEGO DO OBRÓBKII PROFILU JEZDNEGO KÓŁ TRAMWAJOWYCH

W wyniku analizy omówionych wariantów rozwiązania problemu oraz braku pewności, co do skuteczności zaproponowanych rozwiązań powstała koncepcja opracowania konstrukcji specjalnego narzędzia frezarskiego do obróbki obręczy zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi. Można przyjąć, że na skutek innego w porównaniu z toczeniem charakteru pracy narzędzia frezarskiego siły skrawania wyraźnie zmniejszą się przy równoczesnej poprawie warunków usuwania wiórów.

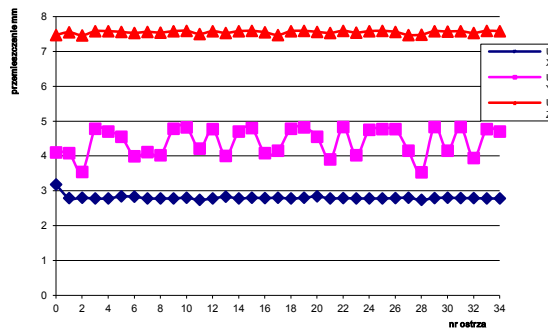
Podjęto decyzję o opracowaniu takiej konstrukcji narzędzia, które wykorzystywałoby ostrza handlowe, a zasada obróbki polegałaby na tym, że wykonanie pełnego

obrotu narzędzia daje w efekcie całkowity profil obrabiany. Takie rozwiązanie zmniejszy zapotrzebowanie na moc narzędzia, a także daje możliwość wpływu na wartości sił skrawania dzięki odpowiedniemu wzajemnemu usytuowaniu ostrzy skrawających.

Do wykonania profilu jezdnego obręczy zostały wybrane ostrza okrągłe o średnicy 10 mm, wykonane z węglików spiekanych o specjalnych właściwościach do obróbki stali utwardzonej lub żeliwa. Węgliki spiekane stanowią dziś najważniejszą grupę materiałów na narzędzia skrawające. Decydują o tym ich dobre właściwości skrawne, uniwersalność zastosowań i względnie niski koszt [9].

Zgodnie z przyjętą metodyką prowadzenia badań, precyzyjne określenie sił skrawania odgrywa szczególną rolę i w związku z tym przyjęto, że najlepszym sposobem na ustalenie ich wartości będzie pomiar sił podczas obróbki.

Kolejnym etapem było opracowanie konstrukcji korpusu narzędzia frezarskiego w celu zapewnienia odpowiedniego ustawienia płytek skrawających. Aby zapewnić odwzorowanie powierzchni obrobionej zgodne z uzyskiwanym podczas toczenia i uzyskać możliwość kompensacji sił parami pracujących ostrzy należy więc użyć 34 par jednocześnie pracujących ostrzy.



Rys. 3.1. Przemieszczenie określone w punkcie przyłożenia siły skrawania dla każdej z pracującej pary ostrzy.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania opracowane zostały modele obliczeniowe MES procesu skrawania koła z wkładkami elastycznymi, z których każdy odzwierciedlał pracę pojedynczej pary pracujących równocześnie ostrzy.

Na podstawie obliczeń modeli MES, w których obciążeniem były siły skrawania generowane przez kolejne, wchodzące do pracy pary ostrzy, określono wzajemne położenie tych ostrzy w taki sposób, aby nie pojawiały się gwałtowne zmiany przemieszczenia obręczy koła jezdnego. Wartości przemieszczeń w miejscu skrawania zostały przedstawione w formie wykresu na rys. 3.1.

Wyniki analizy obliczeniowej wykazują, że decydujący wpływ na przemieszczenia mają siły powstające w układzie napędzającym przedmiot obrabiany (rolki napędzające) oraz siły wstępnego zacisku powstające we wkładkach elastycznych. Różnice między maksymalnym a minimalnym przemieszczeniem w kierunkach promieniowym i osiowym, spowodowane siłą skrawania, nie przekraczają wartości 0,08 mm.

Opracowano postać konstrukcyjną narzędzia jako frezu nasadzanego z kasetami mocującymi ostrza skrawające do jego korpusu. Zgodnie z przyjętym wcześniej założeniem dotyczącym pozycjonowania układu ostrzy w taki sposób, by jednocześnie pracowały tylko dwa ostrza, opracowano konstrukcję kaset mocujących po dwie płytki skrawające. Takie rozwiązanie znacznie upraszcza technologię wykonania narzędzia, a jednocześnie ułatwia wzajemne pozycjonowanie płytek skrawających w każdej z jednocześnie pracujących par ostrzy.



Rys. 3.3. Projekt narzędzia z kasetami mocującymi ostrza skrawające (po lewej – wizualizacja 3D w programie CATIA V5; po prawej – zdjęcie wykonanego i złożonego korpusu narzędzia).

Kształt gniazd oraz mocowanie płytek skrawających zaprojektowano w taki sposób by zapewniona została pewność mocowania i dokładność ustalenia płytek. Mocowanie płytek w gniazdach zrealizowano za pomocą śrub usytuowanych centralnie z ustaleniem na bocznej powierzchni stożkowej przy jednoczesnym podparciu dolną płaszczyzną płytki.

Przedstawione założenia konstrukcyjne narzędzia frezarskiego gwarantują to, że wykonany prototyp będzie w pełni wykorzystywał możliwości obróbkowe ostrzy skrawających. Ponadto, taka konstrukcja daje możliwość łatwego przeprowadzenia modyfikacji funkcjonalno-konstrukcyjnych narzędzia jeśli okaże się, że mimo szczegółowych analiz MES nie zostaną osiągnięte zaplanowane rezultaty.

4. WYKONANIE PROTOTYPU NARZĘDZIA FREZARSKIEGO DO OBRÓBKII PROFILU JEZDNEGO KÓŁ TRAMWAJOWYCH

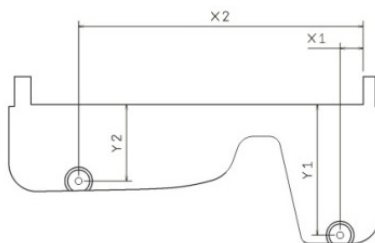
Na podstawie opracowanych założeń konstrukcji narzędzia frezarskiego do obróbki profili jezdnych kół tramwajowych oraz przeprowadzonych analiz obliczeniowych wytworzony został prototyp narzędzia. W ramach dalszych prac zaplanowano przetestowanie wykonanego prototypu narzędzia pod kątem weryfikacji postawionych założeń.

Sposób ustalenia kaset wymagał wykonania w korpusie narzędzia frezarskiego rowków o przekroju prostokątnym odpowiedniej szerokości i głębokości. Szerokość rowka równa jest grubości kasety, a głębokość rowka musiała umożliwić zachowanie wymiarów zewnętrznych narzędzia.

W celu jak najlepszego podparcia kaset kształt zewnętrznego zarysu korpusu narzędzia został wykonany jako odsunięcie uproszczonego zarysu profilu obrabianego koła.

Zewnętrzny zarys kaset mocujących został wykonany zgodnie z założeniami jako uproszczony zarys profilu obręczy obrabianego koła jezdnego odsunięty o 2 mm od kształtu obrabianego.

Po obrobeniu wszystkich powierzchni kaset następnie wykonano gniazda mocujące płytki skrawające w odpowiednich miejscach indywidualnie dla każdej pary ostrzy skrawających.



Rys. 4.1. Kształt kasety mocującej z naniesionymi współrzędnymi przykładowo umiejscowionych gniazd płytek skrawających.

Po wykonaniu wszystkich elementów konstrukcji narzędzie zostało zmontowane w celu przeprowadzenia prób skrawaniowych. Do badań przygotowano specjalną próbkę o profilu jezdnego koła tramwajowego o długości 150 mm. Przygotowanie próbki o takim kształcie wynikało z konieczności zamocowania jej na siłomierzu sześcioskładowym Kistler 9257B w celu pomiaru sił skrawania podczas obróbki narzędziem frezarskim.

Wynikiem przeprowadzonych badań były przebiegi wartości sił skrawania dla różnych grubości warstwy skrawanej. Wyniki przedstawiono w formie wykresu na rysunku 4.2. na którym wyodrębniony został przebieg wartości sił dla jednego obrotu narzędzia.

Można zaobserwować, że przebieg wartości sił skrawania jest bardzo stabilny. Nie ma skokowych zmian wartości, a siła działająca w kierunku osiowym (F_z) ma stałą niewielką wartość i przy zakładanej głębokości skrawania 5 mm osiąga wartość wynosząca 110 N.

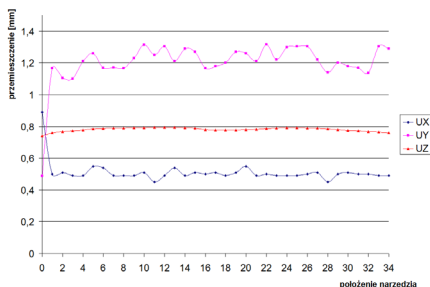
Zmierzone wartości siły skrawania wykorzystane zostały do analiz modelowych MES obrabianego koła tramwajowego w celu określenia przemieszczeń elementów układu OUPN. Ze względu na znaczny spadek wartości sił skrawania uwzględnione zostały również zmniejszone siły docisku rolek napędzających przedmiot obrabiany.

Na podstawie zarejestrowanego przebiegu (dla głębokości frezowania 5 mm) dla jednego obrotu narzędzia wyznaczono 34 wartości sił odpowiadające pracy kolejnym parom ostrzy odpowiednio jak to przyjęto w obliczeniach we wcześniej opracowanym modelu. Pełny stan obciążenia został zaprezentowany na rys. 4.2.

Na podstawie uzyskanych wyników analiz należy stwierdzić, że osiągnięto stabilne warunki pracy podczas obróbki prototypowym narzędziem.

W związku z tym przeprowadzona została symulacja obciążenia modelu koła przy odpowiednio zmniejszonym nacisku rolek napędzających.

Zgodnie z oczekiwaniami wartość przemieszczenia węzła w strefie skrawania uległa znacznemu zmniejszeniu. Nie uległ zmianie kształt przebiegu przemieszczenia podczas obrotu narzędzia. Również i w tym przypadku wahania wartości przemieszczenia w węźle w kierunku wzdłuż osi zestawu kołowego nie przekraczają 0,05 mm.



Rys 4.2. Wyznaczone wartości przemieszczeń dla przyjętych na podstawie badań wartości sił skrawania oraz obniżonych sił docisku rolek napędzających.

Można zatem przyjąć, że wykonany prototyp spełnił wszystkie postawione wcześniej założenia.

W podsumowaniu końcowym można stwierdzić, że zaproponowana technologia obróbki profili jezdnych zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym spełnia postawione wymagania i jest gotowa do wdrożenia w praktyce przemysłowej. Głównym elementem tej technologii jest użycie specjalnego narzędzia frezarskiego oraz oprzyrządowania umożliwiającego jego pracę. Konstrukcja specjalnego narzędzia frezarskiego jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

LITERATURA

- [1] CICHOSZ P.: Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego. Część I., *Mechanik* 2004, Nr 10.
- [2] CICHOSZ P.: *Kierunki zwiększania efektywności toczenia*, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, PAN, 17, 1993, 4.
- [3] CICHOSZ P.: *Narzędzia skrawające*, WNT, Warszawa, 2006.
- [4] DMOCHOWSKI J.: *Podstawy obróbki skrawaniem*, WNT, Warszawa, 1983.
- [5] FILIPOWICZ K.: Basic data for construction of cutting tool generating required cutting force model, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Nr 2, 2013.
- [6] FILIPOWICZ K., BIEDUNKIEWICZ W., GRZESIAK D., KRÓLIKOWSKI M.: *Technological problems in machining of resilient wheelsets on wheel-turning lathes with friction drive*, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Nr 1, 2012.
- [7] GÓRSKI E.: *Frezy*, WNT, Warszawa, 1977.
- [8] GÓRSKI E.: *Poradnik frezera*, WNT, Warszawa, 2000.
- [9] OLSZAK W.: *Obróbka skrawaniem*, WNT, Warszawa 2008.
- [10] ROMANISZYN Z.: *Podwozia wózkowe pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Instytutu Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
- [11] SAŁACIŃSKI T.: *Postępy w konstrukcji narzędzi skrawających*, Czasopismo internetowe www.e-obrobkametalu.pl nr2/2012.