



ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY  
W SZCZECINIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Instytut Technologii Mechanicznej

Krzysztof Filipowicz

Praca doktorska

**Technologiczne aspekty regeneracji obręczy zestawów kołowych  
z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym**

Promotor

dr hab. inż. prof. ZUT Witold Biedunkiewicz

Szczecin 2014

*Pragnę podziękować mojej Żonie i Córce  
za cierpliwość i wsparcie w trakcie długotrwałego  
prowadzenia badań i mozolnego pisania pracy.*

<b>1. Wstęp</b>	<b>4</b>
<b>2. Analiza stanu zagadnienia</b>	<b>8</b>
<b>3. Cel pracy</b>	<b>27</b>
<b>4. Modelowanie procesu obróbki zestawu z wkładkami elastycznymi za pomocą MES</b>	<b>30</b>
<b>5. Opracowanie założeń konstrukcyjnych prototypu narzędzia frezarskiego do obróbki profilu jezdnego kół tramwajowych</b>	<b>63</b>
<b>6. Wykonanie prototypu narzędzia frezarskiego do obróbki profilu jezdnego kół tramwajowych</b>	<b>81</b>
<b>7. Wnioski</b>	<b>96</b>
<b>Literatura</b>	<b>100</b>

#### **Załączniki:**

**Rysunki konstrukcyjne prototypu narzędzia frezarskiego do obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi.**

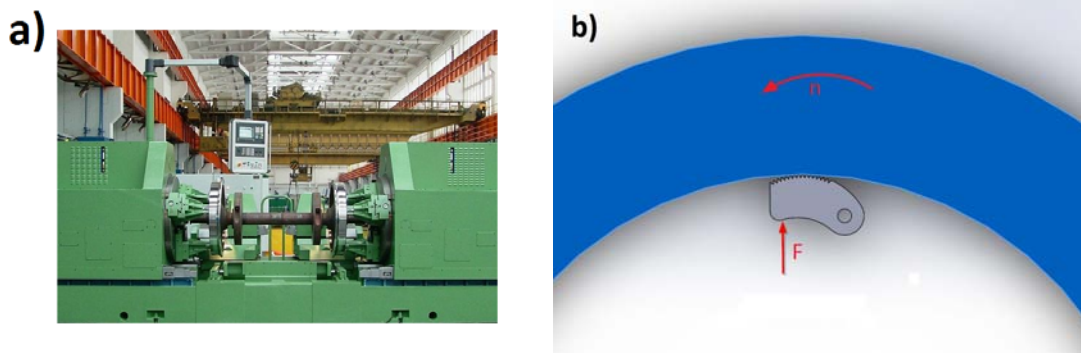
# 1. Wstęp.

Zestawy kołowe z wkładkami elastycznymi są wykorzystywane w pojazdach szynowych przeznaczonych do ruchu miejskiego. W celu zmniejszenia drgań oraz hałasu wywołanych toczeniem 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.

Zużycie profilu jezdnych kół pojazdów szynowych następuje w sposób zróżnicowany w różnych fragmentach profilu. Obróbka regeneracyjna jest możliwa, bowiem średnica toczna koła może zmieniać się w zakresie do 50 [mm] [31]. W związku z tym w procesie regeneracji profilu jezdnych w pewnych fragmentach zarysu należy usunąć znaczną ilość materiału. Ze względów ekonomicznych proces powinien przebiegać z dużą wydajnością, co z kolei powoduje konieczność stosowania dużych przekrojów warstwy skrawanej w jednym przejściu noża tokarskiego. Powoduje to konieczność prowadzenia obróbki profilu jezdnych kół pojazdów szynowych z ekstremalnie wysokimi parametrami skrawania, przez co przedmiot obrabiany poddawany jest działaniu sił o dużych wartościach. Taki stan rzeczy wymaga stosowania

dużych sił mocowania i napędzających przedmiot obrabiany, a to z kolei znacznie utrudnia obróbkę kół zawierających w swojej konstrukcji elementy elastomerowe.

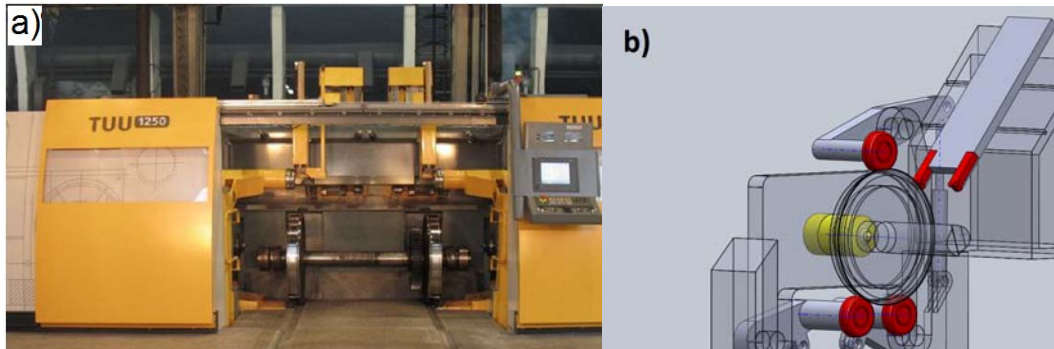
Urządzeniami technologicznymi przeznaczonymi do obróbki profili jezdnych zestawów kół pojazdów szynowych są tokarki kołowe. Do niedawna obrabiarki te wykorzystywały do napędzania przedmiotów obrabianych zabieraki krzywkowe opierające się o wewnętrzne powierzchnie obręczy kół toczzonego zestawu.



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

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, z powodu braku dostępu do wewnętrznych powierzchni obręczy oraz bardzo małej sztywności koła.

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

Taki sposób napędu eliminuje niebezpieczeństwo uszkodzenia obręczy przez zabieraki krzywkowe. Ponadto taki sposób napędu nie wymaga dostępu zabieraków od 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 [12].

Obróbka zestawów kołowych prowadzona na tokarkach kołowych jest realizowana z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanych do tego celu narzędzi skrawających umożliwiających pracę z wymaganymi, bardzo wysokimi parametrami. Narzędzia te są przystosowane do skrawania z dużymi przekrojami warstwy materiału o twardości rzędu 27HRC, co wiąże się z pojawianiem się bardzo dużych sił skrawania. Ponadto, materiały zastosowane do produkcji zestawów kołowych nie pozwalają na zastosowanie cieczy chłodząco-smarującej w procesie skrawania, co również istotnie wpływa na obciążenie ostrza skrawającego.

Zarysowana problematyka jest na tyle skomplikowana, a zarazem interesująca, głównie od strony praktycznej, że w rozprawie doktorskiej dokonano dokładnej jej analizy (zarówno teoretycznej, jak i doświadczalnej) oraz zaproponowano konkretne rozwiązanie dotyczące obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym trzyrolkowym.

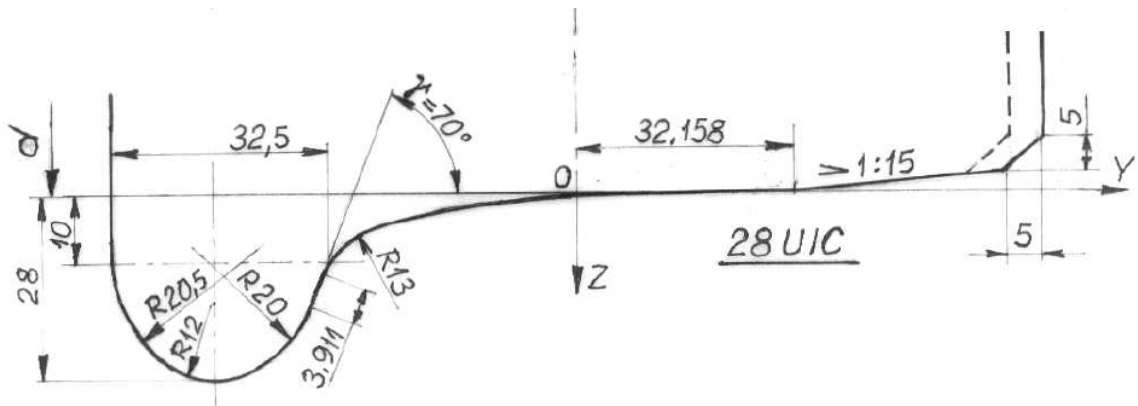
## 2. Analiza stanu zagadnienia.

W pracy poruszonych zostało kilka istotnych zagadnień. Ze względu na dużą ich różnorodność analiza literatury dotyczy najbardziej istotnych. Pierwsze z nich dotyczą zagadnień związanych z technologią obróbki profili jezdnych zestawów kołowych, która realizowana jest z wykorzystaniem tokarek kołowych. Tokarki te są obrabiarkami specjalnymi do przeprowadzania operacji regeneracji profili jezdnych w zestawach kołowych. Wprawdzie urządzenia te mogą być wyposażone w dodatkowe suporty rozszerzają możliwości obróbkowe o dodatkowe operacje, jednakże ich głównym zadaniem jest realizacja właśnie tej konkretnej operacji i postać konstrukcyjna obrabiarki jest podporządkowana temu zadaniu.

Ze względu na powtarzalny, znormalizowany zarys powierzchni obrabianej programy obróbkowe dla tokarek kołowych nie są zróżnicowane i w związku z tym są zapisane w układzie sterowania obrabiarki. Profil jezdny koła kolejowego (Rys. 2.1.) jest ściśle określony przez normy krajowe [28] i dlatego operator nie może ingerować w przebieg toru narzędzia. Jediną opcją zmiany toru jest wybór pomiędzy różnymi wariantami obróbki w zależności od charakteru zużycia profilu jezdnego koła występującego w aktualnie obrabianym zestawie kołowym. Operator za pomocą ekranu dotykowego może wprowadzić zalecane wartości sparametryzowanych wielkości jako parametry bezpośrednie, bez ingerencji w wewnętrzną strukturę programu sterującego. Z kolei elastyczny program obróbkowy oblicza pozostałe parametry pośrednie,

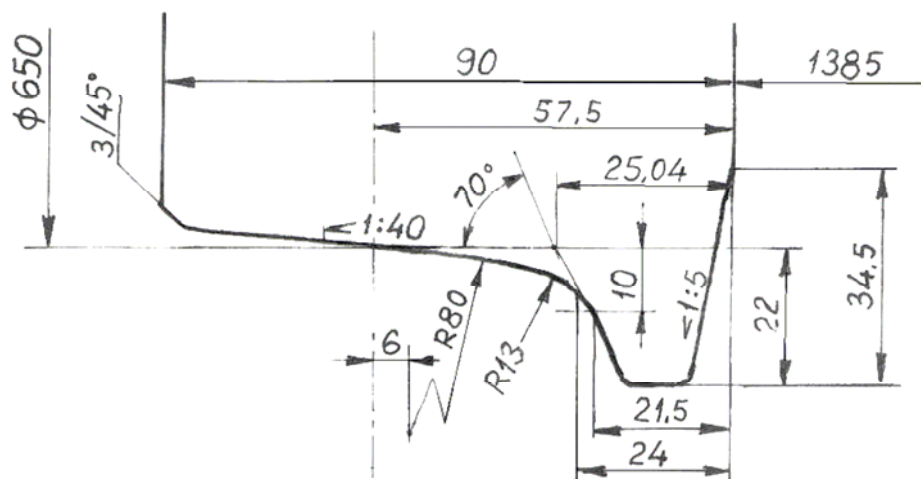


wyznacza nową trajektorię ruchu narzędzia i kontroluje obróbkę z aktywną funkcją kompensacji promienia narzędzi. [31]



Rys.2.1. Podstawowy zarys profilu jezdnego koła kolejowego [33]

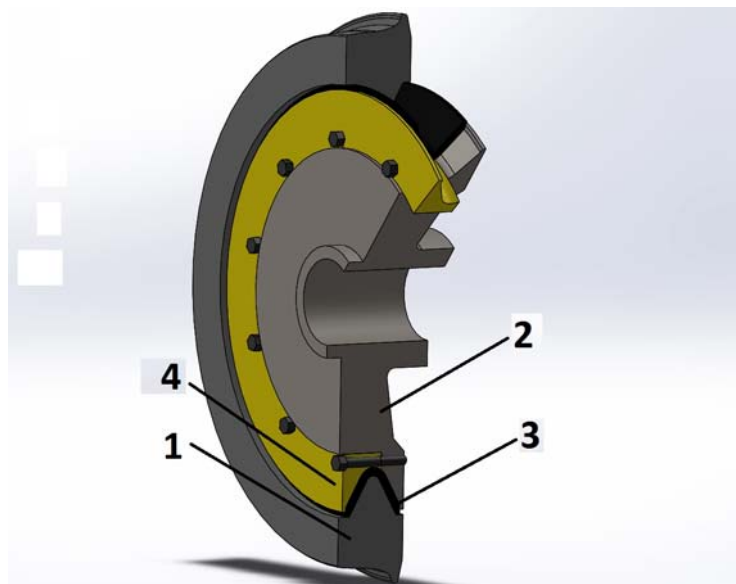
W przypadku kół pojazdów wykorzystywanych w ruchu miejskim profil podlega mniej rygorystycznym regulacjom normatywnym. Wynika to z mniejszych prędkości osiągniętych przez pojazdy w ruchu miejskim, a także z innych warunków współpracy koła z szyną. Ostatecznie, w ruchu miejskim profil jezdny kół tramwajowych różni się od profilu kół kolejowych. Ponadto, zarysy kół tramwajowych nie są znormalizowane z tak dużą szczegółowością poszczególnych fragmentów elementu jezdnego jak zarysy kół kolejowych [28].



Rys.2.2. Zarys profilu jezdnego koła tramwajowego [28].

Również konstrukcja zestawów kołowych jako całości jest inna dla pojazdów w ruchu miejskim aniżeli dla pojazdów kolejowych. W transporcie kolejowym używa się zestawów kołowych wyposażonych w koła z obręczami lub bezobrzczowe (zwane monoblokowymi). W pierwszym przypadku koło składa się z piasty (tzw. koła bosego), obręczy oraz pierścienia zabezpieczającego. Obręcz po nagraniu do relatywnie wysokiej temperatury nakłada się na piastę, a po schłodzeniu powstaje połączenie skurczowe, które siłami tarcia przenosi obciążenia. W rowek obręczy wprowadza się pierścień zaciskowy, stanowiący dodatkowe zabezpieczenie złącza przed niekontrolowanym demontażem. Koła bose z kolei wślaczają się na czopy osi na zimno. Koła monoblokowe mogą być montowane na oś w taki sam sposób jak opisane wyżej koła obręczowane lub mogą być nakładane również na gorąco z wykorzystaniem przedstawionej wyżej zasady [28]. W czasie ruchu kół po szynach występują drgania o szerokim zakresie częstotliwości. W przypadku pojazdów przeznaczonych do ruchu miejskiego drgania te i

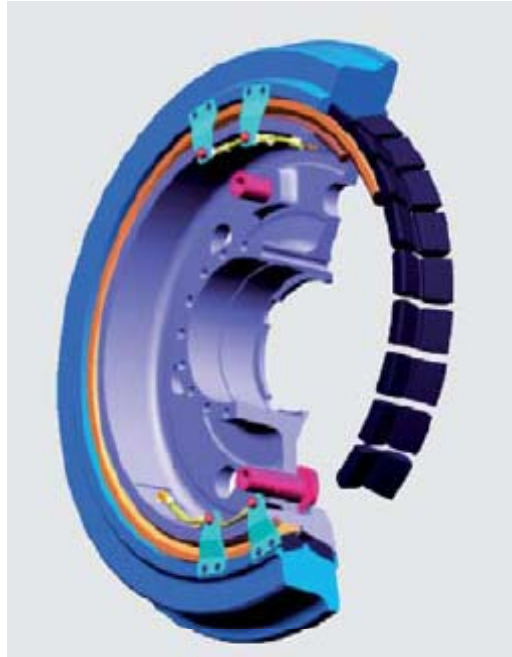
emitowany przy tym hałas jest tłumiony wbudowanymi elementami gumowymi między tarczą koła i obręcz. Stosowane elementy tłumiące mogą mieć postać pierścieni o różnych przekrojach, mogą także składać się z segmentów lub krążków gumowo-metalowych rozmieszczonych na obwodzie. W nowoczesnych tramwajach użytkowanych w Polsce najczęściej stosowane są dwa rodzaje kół tramwajowych z wkładkami elastomerowymi [12]. Pierwszy z nich to koła typu SAB, które wykonane są z trzech części metalowych i wkładki elastycznej będącej ciągłym pierścieniem o przekroju w kształcie litery „V”. Wkładka elastyczna znajduje się między piastą, a obręczą koła i jest zaciskana pierścieniem metalowym mocowanym śrubami na obwodzie [13]. Aby zwiększyć stabilność połączenia bez konieczności przykręcania pierścienia zaciskającego wkładkę z dużą siłą, zastosowano opatentowany system rowków zataczanych na powierzchni styku piasty i obręczy. Powoduje to uzyskanie większej powierzchni przylegania.



Rys.2.3. Przekrój koła typu SAB (1-obrzeż; 2-piasta; 3-wkładka elastomerowa; 4-pierścień dociskający).

Drugim rozwiązaniem stosowanym w nowoczesnych tramwajach w Polsce są koła typu BOCHUM. Koła te posiadają wkładki elastyczne w postaci 24 specjalnie uformowanych kostek rozmieszczonych na obwodzie pomiędzy piastą a obręczą koła. Koła typu BOCHUM występują w kilku odmianach konstrukcyjnych. Pierwsza z nich to koło, w którym zarówno obręcz jak i piasta są odrębnymi bryłami.

Z jednej strony wykonanie elementów metalowych jest dość proste, z drugiej zaś montaż wkładek elastycznych w takim kole (czyli montaż całego koła) jest dość kłopotliwy i często powoduje zniszczenie wkładek podczas montażu tej operacji. Dlatego też, w kolejnych odmianach konstrukcyjnych, zmieniono nieco budowę koła i dodano do piasty pierścień mocujący wkładki, który ma na celu ułatwienie montażu i demontażu wkładek [12]. Kształt obręczy pozostał niezmienny, co powoduje zamienność tych elementów z kołami wyprodukowanymi wcześniej. Powodem wprowadzenia kolejnej odmiany konstrukcyjnej była mała sztywność kół typu BOCHUM w kierunku osiowym. W celu zwiększenia tego parametru zmniejszono gabaryty wkładek elastycznych i nadano im w przekroju kształt litery „V” podobnie jak w kołach typu SAB.

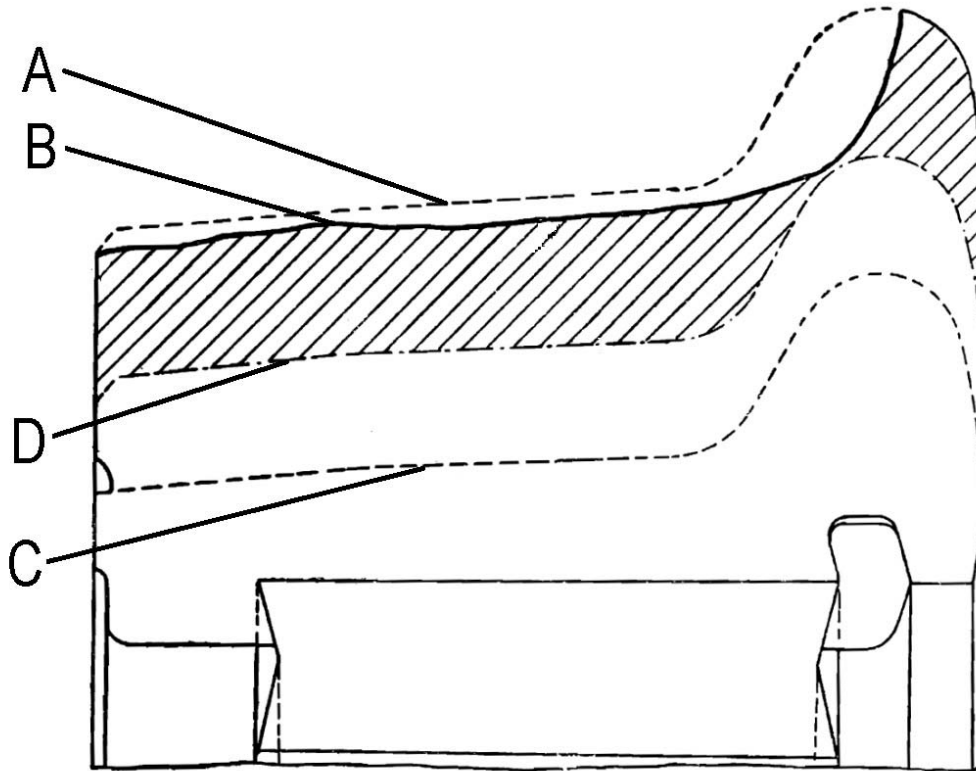


Rys. 2.4. Budowa koła typu BOHUM.

Zarówno konstrukcja jak i właściwości zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi podlegają ochronie patentowej. O ile materiały (stale) użyte do produkcji poszczególnych elementów zestawów kołowych są znormalizowane, a ich właściwości muszą być zgodne z normami, to charakterystyki mechaniczne wkładek elastomerowych nie są znane, a wynika to również z niechęci lub świadomego nie udostępniania tych parametrów przez producentów tych wkładek [12]. Stąd przy realizacji niniejszej pracy powstała potrzeba przeprowadzenia badań właściwości materiałowych wkładek elastomerowych, które następnie wykorzystano w procesie budowy modeli obliczeniowych kół jezdnych wykonanych w konwencji metody elementów skończonych (MES). Szczegółowy opis pomiarów przedstawiono w rozdziale 4 niniejszej pracy.

Ze względu na charakter pracy oraz zużycie profilu jezdnych kół (Rys. 2.5) uzasadnione jest regularne regenerowanie obręczy. W przypadku

doprowadzenia do znacznego zużycia obręczy zestawu kołowego koniecznym staje się usunięcie dużej ilości materiału w celu uzyskania prawidłowego profilu koła zregenerowanego.



Rys. 2.5. Typowe zużycie profilu jezdnych koła pojazdu szynowego: A – profil pierwotny, B- profil zużyty, D- profil zregenerowany, C- profil minimalny.

Regeneracja profili jezdnych zestawu kołowego na tokarce kołowej przeprowadzana jest w procesie jednoczesnego toczenia dwóch zarysów metodą punktową przy użyciu specjalnych narzędzi przystosowanych do obróbki z wymaganymi (odpowiednio dużymi) parametrami. Całkowity naddatek promieniowy na obróbkę regeneracyjną wynosi 25 [mm] [31]. Do niedawna tokarki kołowe wykorzystywały do napędzania przedmiotu obrabianego zabieraki krzywkowe opierające się o wewnętrzne powierzchnie obręczy kół toczonego zestawu. Zabieraki te mają nacięte na krzywkach ostrza dociskane do obręczy z tym większą siłą im większa jest siła hamująca, w tym

przypadku siła skrawania. Rozwiązanie to powoduje ryzyko uszkodzenia obręczy kół przez zabieraki (zbyt intensywne wcinanie się) oraz nie jest możliwe do zastosowania przy toczeniu zestawów z wkładkami elastycznymi, ponieważ w tych rozwiązaniach konstrukcyjnych nie ma dostępu do wewnętrznych powierzchni obręczy.

Tokarki z napędem ciernym wykorzystują do napędzania przedmiotu obrabianego rolek napędzających, które są dociskane do profili jezdnych kół obrabianego zestawu. Napęd przenoszony jest siłami tarcia, co eliminuje niebezpieczeństwo uszkodzenia (skaleczenia) obręczy przez zabierak. Przy zastosowaniu takiego napędu nie jest wymagany dostęp do wewnętrznej części obręczy obrabianych kół, a zatem umożliwia to wykorzystanie tokarek kołowych z napędem ciernym do obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi. Ponieważ wytworzenie siły tarcia znacznie przewyższającej siły skrawania wymaga zastosowania odpowiedniego docisku rolek napędzających do obręczy zestawów kołowych pojawia się problem dodatkowych obciążeń działających na obrabiany przedmiot.

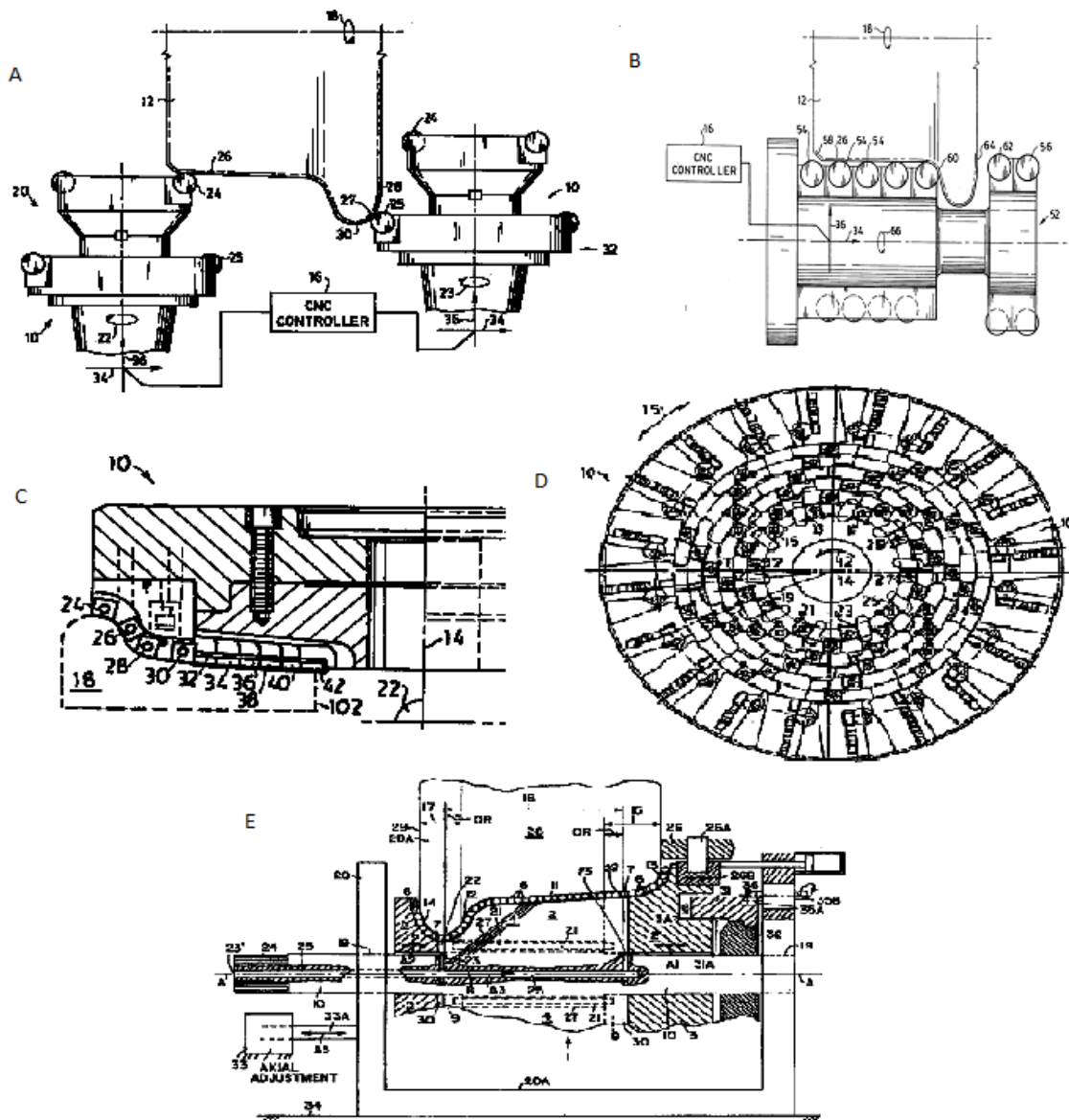


Rys. 2.6. Tokarka kołowa TUU 1250

Ze względu na skomplikowany zarys profilu jezdnych zestawów kołowych obróbka toczeniem odbywa się metodą kopiową lub, w nowych konstrukcjach obrabiarek, z wykorzystaniem sterowania numerycznego. Technologia taka jest znana i stosowana niezmiennie od wielu lat i zapewne z tego powodu trudno dotrzeć do opracowań naukowych szerzej opisujących przebieg obróbki. Informacje niezbędne do opracowania planu badań oraz realizacji rozprawy doktorskiej zostały w dużej części uzyskane od osób zajmujących się praktycznie technologią obróbki na tokarkach kołowych. Nadmienić trzeba, że dotyczy to obróbki zestawów kołowych stosowanych w kolejnictwie. Odnośnie obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi stosowanych w miejskim transporcie szynowym również występuje brak opracowań z uwagi na to, że w zasadzie tokarki kołowe nie są wykorzystywane do wytwarzania lub regeneracji takich zestawów. Inspiracja zastosowania tych obrabiarek do opisywanej technologii powstała jako efekt współpracy Instytutu Technologii Mechanicznej ZUT z firmą produkującą urządzenia technologiczne do wytwarzania i regeneracji zestawów kołowych (zarówno kolejowych jak i tramwajowych).

Istnieją informacje na temat zastrzeżeń patentowych dotyczących narzędzi frezarskich stosowanych do obróbki profili jezdnych kół pojazdów szynowych (Rys 2.7). Wskazuje to jednoznacznie, że istnieje zainteresowanie takimi technologiami, a rynek wykazuje zapotrzebowanie na narzędzia tego typu.

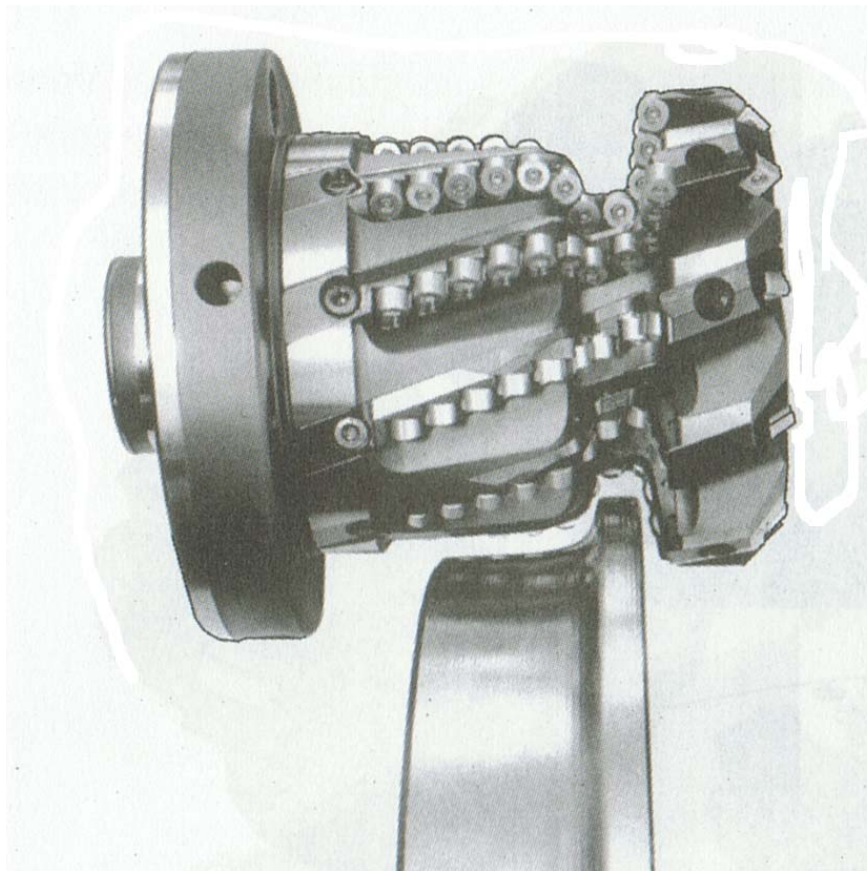




Rys. 2.7. Rozwiązania narzędzi frezarskich do obróbki profilu jezdnych kół pojazdów szynowych [35, 36, 37, 38].

Narzędzia takie umożliwiają kształtowanie zarysu jezdnych kół pojazdów szynowych jednak nie ma danych dotyczących sił skrawania powstających w trakcie obróbki oddziałujących na przedmiot obrabiany. W celu uzyskania korzystnego rozkładu sił skrawania przy obróbce narzędziami frezarskimi stosuje się naprzemiennie krawędzie skrawające. Pochylenie krawędzie łagodzi nierównomierności sił skrawania przy wchodzeniu i wychodzeniu ostrzy

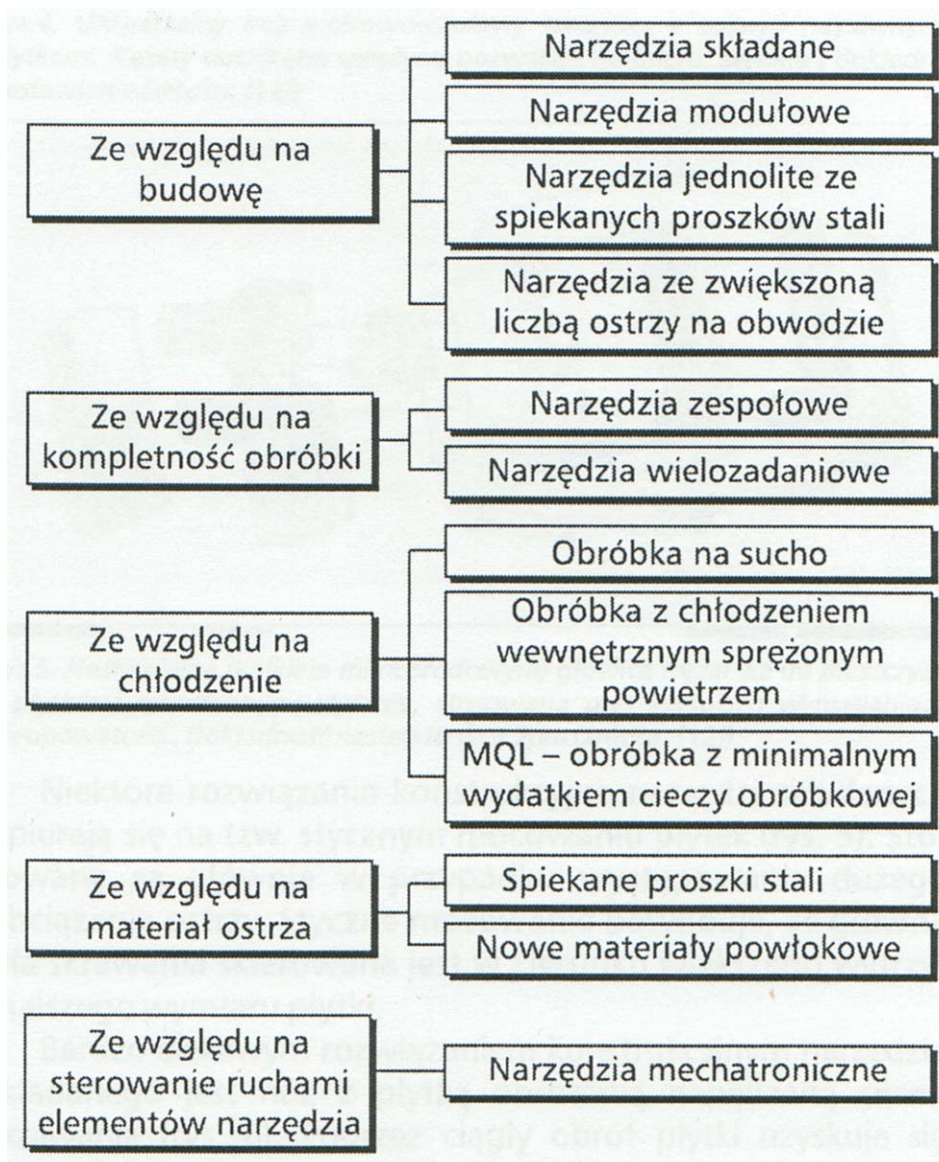
z materiału obrabianego natomiast naprzemienskość równowagi, w dużej mierze, występowanie sił osiowych w obrębie samego narzędzia. [4].



Rys. 2.8 Frez zespołowy do rotacyjnego frezowania kół pojazdów szynowych firmy Kennametal Hertel. [3]

Analizując konstrukcję takich narzędzi (długie odcinki obrabiane jednocześnie oraz asymetryczne obciążenie obrabianego przedmiotu) należy przyjąć, że ta problematyka nie była rozpatrywana z uwagi na relatywnie sztywne zamocowanie przedmiotu obrabianego, co dyskwalifikuje te narzędzia do obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę fakt, że zapotrzebowanie na moc wynikającą z sił skrawania będzie znaczne, co wskazuje na konieczność stosowania dodatkowych, gabarytowo rozbudowanych wrzecion napędzających takie narzędzia.

Stąd wynika drugi przedmiot analizy literatury, którym jest zależność konstrukcji narzędzi skrawających od sił skrawania. Pozycje literaturowe dotyczące tej tematyki, takich autorów jak Stanisław Kunstetter [23] i Eugeniusz Górski [15], były wydane ponad ćwierć wieku temu. Mimo iż od tego czasu nastąpił znaczący rozwój w tej dziedzinie techniki, książki te są do dzisiaj cennym źródłem wiedzy [4]. Przegląd nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi prezentuje w swojej książce prof. dr hab. inż. Piotr Cichosz. Rozwój jaki się dokonał w tej dziedzinie dotyczy przede wszystkim nowoczesnych materiałów narzędziowych, w tym głównie narzędzi z ostrzami wymiennymi. Główne trendy rozwoju konstrukcji narzędzi przedstawione zostały w diagramie prezentowanym na rys.2.9.



Rys.2.9. Trendy w konstrukcji narzędzi skrawających [22].

Trendy rozwojowe konstrukcji narzędzi skrawających zostały podzielone wg następujących kryteriów:

**1. Rozwój narzędzi ze względu na ich budowę.** Obecnie bardzo często stosowane są narzędzia z wymiennymi ostrzami, w tym również narzędzia z wymiennymi kasetami służącymi do montażu ostrzy [11]. Jest to spowodowane przede wszystkim względami ekonomicznymi. Mimo że jednostkowy koszt kompletnego narzędzia w przypadku narzędzia składanego

jest większy, aniżeli narzędzia litego, to uwzględniając ich trwałość (możliwość obróbki większej liczby obrabianych części) okazuje się w rozliczeniu końcowym bardziej ekonomicznym [2]. Wynika to z faktu, że przy normalnej eksploatacji takich narzędzi zużyciu ulegają wyłącznie wymienne ostrza, które są produkowane masowo i przez to są relatywnie tanie. Drugim powodem niskich kosztów ostrzy wymiennych jest niewielka ich objętość, co powoduje niski koszt samego materiału, z którego są wykonane [11]. Z kolei zastosowanie kaset umożliwia użycie tego samego narzędzia do kilku różnych zabiegów przy zmianie w niewielkim stopniu konstrukcji narzędzia (oczywiście w zakresie produkowanych dla danego narzędzia różnego rodzaju kaset).

**2. Zmiany w wytwarzaniu narzędzi jednolitych.** W przypadku narzędzi jednolitych nastąpił skok technologiczny polegający na uproszczeniu ich produkcji [11]. Zaczepnięto technologię spiekania proszków ze stali szybko tnącej, która znacznie uprościła proces produkcji, a którą stosowano przy produkcji narzędzi z różnego rodzaju węglików. Ponadto ze względu na stosowanie większych prędkości skrawania przy zmniejszeniu pozostałych parametrów powstają wióry o mniejszych przekrojach, co umożliwiło zmniejszenie wielkości rowków wiórowych, a tym samym pojawiła się możliwość większego zagęszczenia liczby ostrzy narzędzia. Dodatkowo producenci płytek skrawających prześcigają się w proponowaniu najrozmaitszych kształtów powierzchni natarcia mających na celu uzyskanie łamania wióra dla możliwie szerokiego zakresu parametrów skrawania i dla różnych rodzajów obrabianych materiałów. [4]

**3. Rozwój narzędzi w zakresie koncentracji operacji technologicznych.** Coraz częściej stosowane są narzędzia zespołowe oraz wielozadaniowe.

Narzędzia wielozadaniowe w swojej konstrukcji umożliwiają wykorzystania ich do kilku zabiegów najczęściej wykonywanych jeden po drugim [6]. Mogą one być zbudowane jako układ kilku narzędzi zmontowanych w taki sposób, aby można było je kolejno wykorzystać bez konieczności wymiany całego narzędzia, a jedynie przez zmianę ustawienia względem przedmiotu obrabianego np. przez zmianę pozycji uchwytu.

Występuje również dążenie do ograniczenia ilości stosowanego chłodziwa. W pewnych kombinacjach pary materiał obrabiany – materiał ostrza skrawającego wręcz zaleca się nie stosowanie mediów chłodzących.

Wraz z postępem w dziedzinie materiałów stosowanych na ostrza skrawające nie sposób pominąć szeroką gamę węglików spiekanych. Węgliki spiekane stanowią dziś najważniejszą grupę materiałów na narzędzia skrawające. Decydują o tym ich dobre właściwości skrawne, uniwersalność zastosowań i względnie niski koszt. [27] Właściwości tych materiałów mogą być ściśle dopasowane do konkretnych operacji technologicznych, w tym do takich parametrów jak rodzaj materiału obrabianego, parametry skrawania, czy rodzaj chłodziwa. W coraz większym stopniu wykorzystuje się ceramikę narzędziową. Ponadto producenci dbają o to, by do każdego typu narzędzia dostępna była pełna gama płytek skrawających o różnych właściwościach, tak by maksymalnie poszerzyć możliwości obróbkowe danego narzędzia. Płytki skrawające dostępne są w coraz szerszym asortymencie. Dotyczy to wielkości, kształtu obrysu, ukształtowania powierzchni natarcia i krawędzi skrawających, modyfikacji naroży itp.[4].

W ostatnim czasie dzięki rozwijającym się układom sterowania wprowadzono również możliwość realizacji przez narzędzie pewnych

dodatkowych ruchów, dzięki którym staje się możliwa obróbka części o skomplikowanych kształtach bez konieczności poszerzania możliwości obróbkowych obrabiarki. Narzędzia takie określa się narzędziami mechatronicznymi [8].

Trzeba również stwierdzić, że mimo znacznego postępu w badaniach nad procesem skrawania nastąpił niewielki postęp w zakresie analizy sił skrawania. Do tej pory brak jest wiarygodnych analitycznych metod określania sił skrawania. Z powodzeniem natomiast są wykorzystywane wyniki badań doświadczalnych, które odpowiednio przetworzone stanowią podstawę do określenia sił w procesie skrawania dla potrzeb praktyki przemysłowej [27]. Wartości sił wyznaczone z wykorzystaniem tych modeli należy jednak traktować jako przybliżone. W większości przypadków w procesie konstruowania narzędzi skrawających wykorzystanie tych przybliżonych wartości sił skrawania jest stosowane przy określaniu zapotrzebowania na moc skrawania [25]; lub sprawdzaniu warunków sztywnościowych samego narzędzia lub jego chwytu [11]. Z punktu widzenia celów stawianych w niniejszej pracy zastosowanie wyżej opisane modele analityczno–empiryczne okazują się niewystarczające, głównie ze względu na dokładność wymaganą w procesie budowy i obliczeń modeli MES, w tym przypadku modelujących podatny przedmiot obrabiany obciążony relatywnie dużymi siłami skrawania.

Od pewnego czasu stosowane są również narzędzia zespołowe, których postać konstrukcyjna jest tak przyjmowana, by siły skrawania w danym kierunku były zrównoważone. Również w takich przypadkach nie są wykonywane obliczenia sił skrawania, a zrównoważenie ich wynika z symetrii układu ostrzy. W zespole frezów walcowych różnym kątem  $\lambda_s$  powodują zrównoważenie sił

biernych  $F_p$  działających równolegle do osi frezów [27]. Trzeba przyznać, że takie podejście jest skuteczne i daje pozytywne efekty bez zbędnego komplikowania procesu konstruowania narzędzi, jednakże należy zrezygnować z możliwości otrzymania precyzyjnych informacji na temat rzeczywistego stanu sił w procesie skrawania, a tym samym dokładnego wyznaczenia stanu odkształceń w układzie OUPN. W sytuacjach obróbki skomplikowanego kształtu lub niemożności symetrycznego usytuowania ostrzy skrawających w narzędziu zagadnienia szacowania wartości sił skrawania powodujących złożony stan odkształceń układu OUPN komplikują się i przybliżone metody obliczeń okazują się niewystarczające.

Analityczne wyznaczanie sił skrawania jest zadaniem bardzo złożonym, wymagającym uwzględnienia wielu czynników determinujących opór skrawania [27]. Jednym z takich czynników jest geometria ostrza skrawającego, jednak wykorzystując gotowe ostrza ukształtowane przez producentów płytek skrawających pozbawiamy się możliwości wpływu na zmianę siły panujących w układzie OUPN. Należy dodać, że producenci nie zawsze podają wartości współczynników oporu skrawania, a podane wartości w katalogach pozwalają jedynie na oszacowanie mocy skrawania. Trudno na tej podstawie przeprowadzić dokładne analizy zmierzające do równoważenia składowych sił skrawania, tak by odkształcenia, zwłaszcza podatnych przedmiotów obrabianych, były minimalne. Konstruując narzędzia lub też zespoły narzędzi w zasadzie to praktyka inżynierska, a nie badania analityczne pozwalają osiągnąć zakładane cele. Przykładem mogą być frezy z ostrzami daszkowymi, lub zespoły frezów ustawione tak, by kąt przystawienia ich ostrzy był wzajemnie symetryczny, co determinuje względne zrównoważenie składowych sił



(Rys. 2.10.). Tego typu rozwiązania dają pozytywne rezultaty, jednakże mają zastosowanie tylko przy obróbce zarysów symetrycznych.

Ponieważ przy standardowej eksploatacji narzędzi precyzyjne określenie układu i wartości działających sił jest trudne, a uzyskanie tych informacji w sposób analityczny często wręcz niemożliwe, jedynymi sposobami stają się metody doświadczalne pozwalające na precyzyjne określenie rzeczywistego stanu sił dla konkretnego przypadku obróbki. W szczególności dotyczy to procesów obróbki skrawaniem podatnych przedmiotów obrabianych o niesymetrycznych kształtach.

a)



b)



c)



Rys. 2.10. Narzędzia kompensujące układ sił skrawania: a)- frez daszkowy, b)- frez trójścienny naprzemiennie, c)- frez zespołowy naprzemiennie.

Powyższy opis odzwierciedla problemy stawiane w tej pracy, tj. opracowanie i określenie uwarunkowań technologii obróbki przedmiotów

podatnych jakimi są zestawy kołowe z wkładkami elastycznymi. Zarys obręczy kół jest krzywoliniowy i niesymetryczny, co w znacznym stopniu utrudnia równoważenie składowych siły skrawania wywieranych przez narzędzie na przedmiot obrabiany podczas obróbki.

W celu oceny wpływu sił powstających podczas obróbki na odkształcenia koła z wkładkami elastycznymi użyto jako narzędzia obliczeniowego metody elementów skończonych. Jest to ogólnie znana metoda obliczeń wytrzymałościowych, jednakże pewną nowością aplikacyjną jest zastosowanie jej do zamodelowania przedmiotu obrabianego o wyjątkowo dużej podatności obciążonego siłami skrawania o dużej wartości.

### 3. Cel pracy.

Celem pracy jest analiza i rozwiązanie problemów technologicznych dotyczących obróbki zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym. Trudność obróbki tych zestawów wynika ze specyficznej postaci konstrukcyjnej przedmiotu obrabianego determinującej jego sztywność, a z technologicznego punktu widzenia jego mocowanie i przenoszenie napędu podczas procesu regeneracji. Ponadto istotnym zagadnieniem jest wydajność procesu, która wymaga prowadzenia obróbki z odpowiednio intensywnymi parametrami skrawania, w tym głównie obróbki z dużymi przekrojami warstwy skrawanej.

Przedstawiona problematyka wymaga zatem szczegółowej analizy sztywnościowo-wytrzymałościowej układu OUPN, a w szczególności predykcji zachowania się przedmiotu obrabianego obciążonego znacznymi siłami skrawania oraz analizy wpływu tego obciążenia na efekt procesu regeneracji profilu. Proces badawczy przedstawionych problemów powinien być prowadzony dwutorowo: analitycznie i doświadczalnie. Z uwagi na wielość zmiennych czynników wpływających na efekt regeneracji zestawów kołowych propozycją jest opracowanie modelu obliczeniowego obrabianego koła zestawu tramwajowego umożliwiającego relatywnie szybkie wariantowanie różnych przypadków obróbki oraz zmiany wartości parametrów skrawania. Model taki opracowany zostanie z wykorzystaniem technik komputerowych do obliczeń sztywnościowo-wytrzymałościowych na bazie metody elementów skończonych,

przy czym proces modelowania uwzględniać powinien nie tylko konstrukcję zestawu kołowego lecz również pozostałe elementy układu OUPN.

Z uwagi na problemy związane z analitycznym wyznaczaniem wartości wymuszeń siłowych w procesie obróbki (opisane w rozdz. 2) niezbędnym będzie przeprowadzenie badań doświadczalnych (w tym budowa oprzyrządowania pomiarowego) określających wartości sił działających na przedmiot obrabiany podczas pracy. Badaniom podlegać będą również efekty oddziaływań parametrów obróbki tj. przemieszczenia przedmiotu obrabianego w strefie skrawania. Badania doświadczalne powinny mieć również charakter badań weryfikujących wyniki obliczeń analitycznych – walidacja modeli obliczeniowych. W efekcie końcowym zaplanowanych badań analitycznych i doświadczalnych powinna zostać opracowana technologia regeneracji zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach z napędem ciernym na tyle zaawansowana, by możliwym było szybkie wdrożenie rozwiązania w praktyce przemysłowej.

Nakreślona wyżej (w sposób ogólny) metodyka rozwiązywania problemów technologicznych związanych z obróbką tramwajowych zestawów jezdnych na tokarkach kołowych z napędem ciernym skłania do zdefiniowania celów szczegółowych prowadzących do osiągnięcia celu głównego. Przyjęto następujący szczegółowy program badań:

1. Opracowanie modelu MES zestawu kołowego z wkładkami elastycznymi oraz analiza sztywności tego zestawu podczas toczenia na obrabiarce z napędem ciernym, w tym elementami tak zdefiniowanego celu powinny być: proces doskonalenia modelu obliczeniowego wraz z wprowadzeniem

niezbędnych uproszczeń modelowych; doświadczalna weryfikacja wyników obliczeń.

2. Opracowanie wariantów koncepcji wprowadzenia (w tym analizy modelowe) specjalnego oprzyrządowania wspomagającego proces toczenia zestawów kołowych; wytworzenie oprzyrządowania, montaż jego na stanowisku roboczym oraz próba pracą.
3. Opracowanie koncepcji specjalnego narzędzia skrawającego do regeneracji zestawów kołowych na podstawie doświadczeń wynikających z wcześniej opracowanych wariantów rozwiązania oraz analiz modelowych.

Opracowanie konstrukcji specjalnego narzędzia skrawającego, wykonanie jego prototypu oraz badania doświadczalne w procesie obróbki profilu jezdnych zestawów kół tramwajowych.

Osiągnięcie celów cząstkowych wyżej zdefiniowanych powinno przyczynić się w rezultacie do opracowania gotowej do wdrożenia, skutecznej oraz wydajnej technologii regeneracji profilu jezdnych tramwajowych zestawów kołowych na tokarkach z napędem ciernym. Technologia ta powinna cechować się wydajnością zbliżoną do wydajności toczenia kolejowych zestawów kołowych oraz dokładnością obróbki na poziomie wymagań normatywnych.

## **4. Modelowanie procesu obróbki zestawu kołowego z wkładkami elastycznymi metodą elementów skończonych.**

W celu określenia wielkości odkształceń obrabianego koła poddanego działaniu sił w trakcie procesu skrawania na tokarce kołowej z napędem ciernym, wykorzystano program obliczeniowy COSMOS/M metody elementów skończonych. Uzyskanie dokładnych, wiarygodnych wyników analizy wymagało opracowania modelu obliczeniowego o takim zagęszczeniu elementów skończonych, by możliwe było zamodelowanie sił obciążających oraz wyznaczenie stanu odkształceń obręczy koła na obwodzie w odległościach odpowiadających kątowni 1[°]. Powyższa dokładność wynika z faktu, że w kole typu Bochum wkładki elastyczne, których na obwodzie jest 24, nie tworzą ciągłego wypełnienia między piastą a obręczą obrabianego koła i w związku z tym stan odkształceń obręczy koła może charakteryzować się bardzo skomplikowaną postacią.

Opracowany został model obliczeniowy obrabianego pojedynczego koła zamocowanego w kłach obrabiarki napędzanego rolkami dociskającymi. Proces skrawania, który realizowany jest nożem tokarskim zamocowanym w imaku skośnym ustawionym w przestrzeni odchylonym o kąt 30 [°] od pionu.

Takie ustawienie imaka nożowego ma na celu polepszenie spływu wióra podczas skrawania. Modelując obiekt przyjęto minimalne dopuszczalne wymiary obręczy koła (koło wyeksploatowane) z uwagi na to, że w tym przypadku sztywność obręczy jest najmniejsza, a zatem pojawi się najbardziej niekorzystny stan odkształceń. Do analiz wstępnych przyjęto wyznaczone analitycznie wartości sił skrawania występujące w procesie na podstawie jego parametrów, geometrii ostrza skrawającego oraz skrawalności materiału, natomiast wartości sił docisku rolek napędzających zostały przyjęte zgodnie z danymi technicznymi producenta obrabiarki. Wartość siły tarcia rolek napędzających została przyjęta na poziomie wartości siły obwodowej skrawania (siły te równoważą się).

Położenie rolek napędzających oraz noża skrawającego wynika z geometrii układu OUPN obrabiarki TUU 1250 i zostało zamodelowane w systemie CAD CATIA V5, co ułatwiło określenie położenia punktów styku rolek napędzających i ostrza narzędzia skrawającego względem powierzchni obrabianej obręczy koła. Model CAD koła zawierał również wkładki elastyczne między piastą koła, a obręczą, które rozlokowano na obwodzie koła. Ustalono, że każda z 24 wkładek znajdujących się na obwodzie piasty stanowi wycinek  $10,45$  [°], natomiast przestrzeń między wkładkami odpowiada kątowi  $4,55$  [°] co w sumie odpowiada kątowi  $15$  [°].

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.

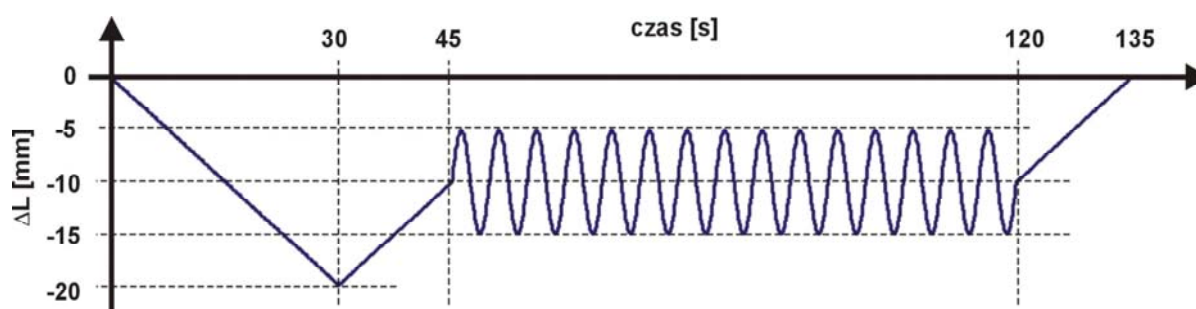
Właściwości materiałowe wkładek gumowych nie są określone w normach, a ponadto nie są udostępniane przez producentów i dlatego parametry charakteryzujące te własności zostały zmierzone w próbach wytrzymałościowych dla wkładek nowych oraz dla wkładek wyeksploatowanych. Wyniki przeprowadzonych prób ściskania próbek materiałów elastomerowych stosowanych w zestawach kołowych przedstawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.1. Wymiary próbek elastomerowych wykorzystanych do badań wytrzymałościowych

Wymiary próbek o kształcie prostopadłościanu:

	Grubość [mm]	Szerokość [mm]	Wysokość [mm]
Próbka wyeksploatowana 1	35	44	64,5
Próbka wyeksploatowana 2	28	43	62
Próbka wyeksploatowana 3	31	45	61
Próbka nowa	36	42	61,5

Próbki do badań wytrzymałościowych zostały przygotowane w taki sposób, że z każdej wkładki, zarówno wyeksploatowanej jak i nowej, wycięto możliwie największy (w sensie wymiarów) prostopadłościan (Tab. 4.1).



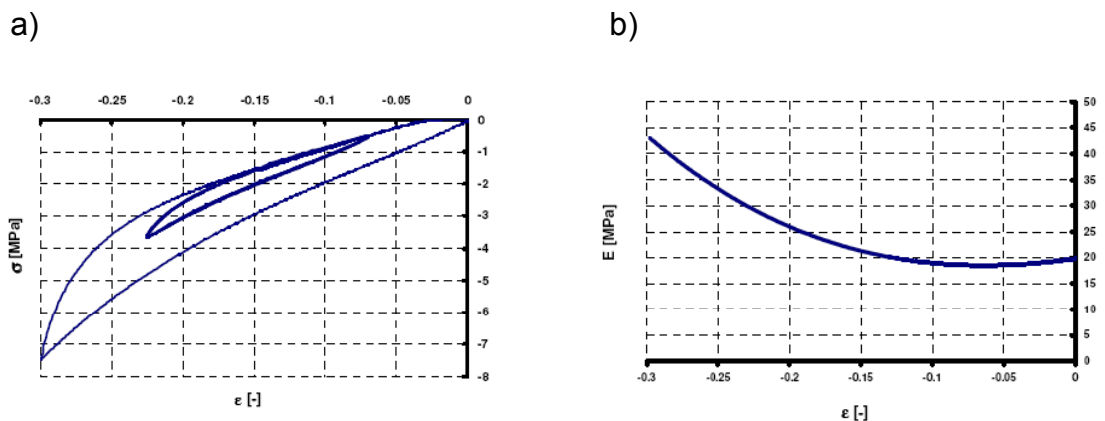
Rys. 4.1. Przebieg obciążenia próbki elastomerowej podczas badań wytrzymałościowych



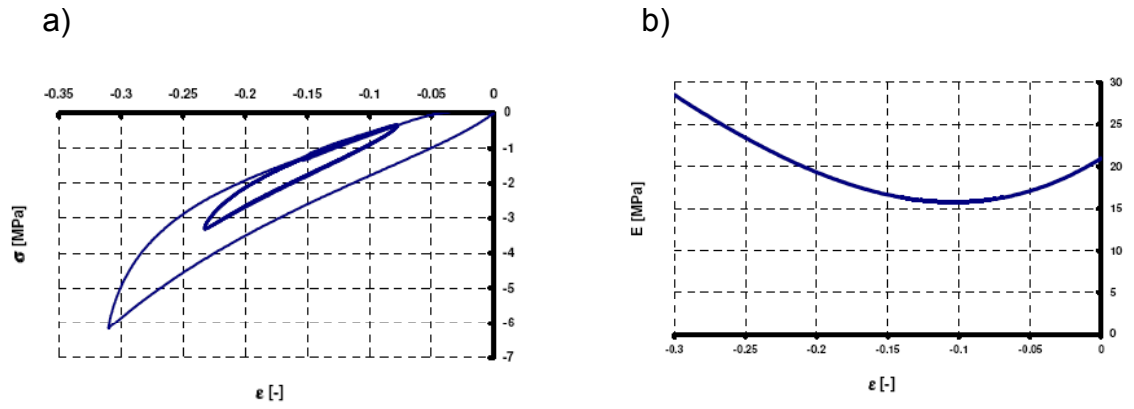
Program badań realizowano przy zadanym cyklu przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej zgodnie ze schematem podanym na rys. 4.1.

Rysunki 4.2. do 4.5. przedstawiają wykresy przebiegu prób ściskania, na których szczegółowo pokazano:

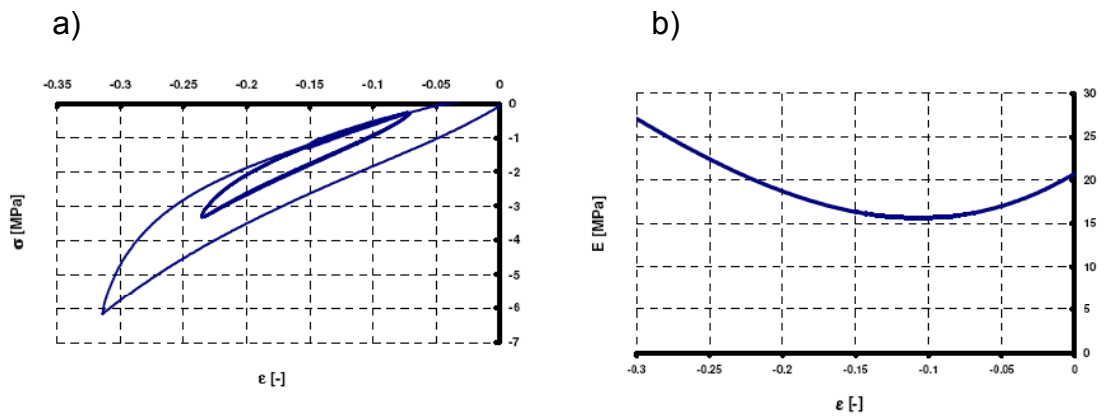
- naprężenie ściskające w funkcji odkształcenia zarejestrowanego w czasie 0÷135[s], (przebieg cyklu obciążenia pokazany na rys 4.1.); zależność:  $\sigma = f(\epsilon)$ ,
- moduł sprężystości podłużnej w funkcji odkształcenia jakie zarejestrowano w czasie 0÷30[s] (przebieg cyklu obciążenia pokazany na rys 4.1.); zależność:  $E=f(\epsilon)$ .



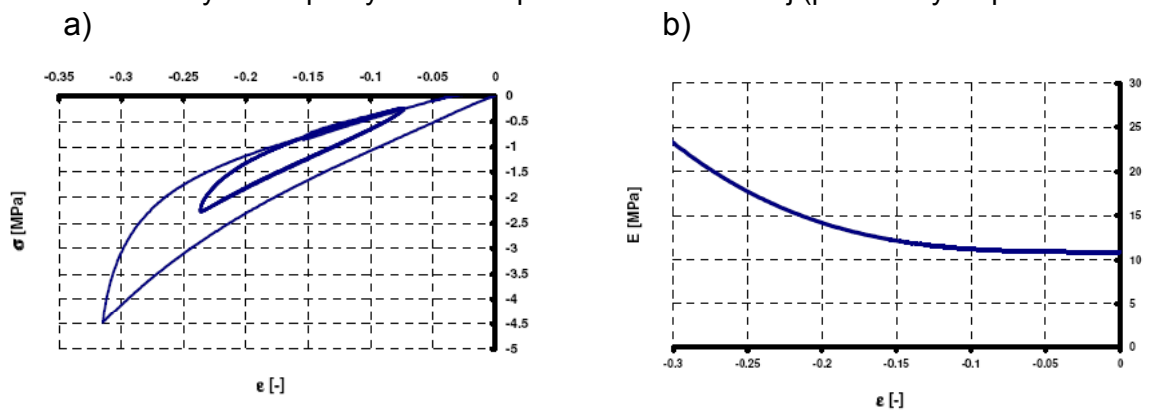
Rys. 4.2. Graficzny obraz próby ściskania próbki elastomerowej (próbka wykorzystana 1)



Rys. 4.3. Graficzny obraz próby ściskania próbki elastomerowej (próbka wyeksplotowana 2)



Rys. 4.4. Graficzny obraz próby ściskania próbki elastomerowej (próbka wyeksplotowana 3)



Rys. 4.5. Graficzny obraz próby ściskania próbki elastomerowej (próbka nowa)

Z wykresów naprężenia w funkcji odkształcenia (rys. 4.2÷4.5) można wywnioskować, że w próbkach wyeksploatowanych wzrasta naprężenie, co ma związek z utwardzeniem się elastomeru po długotrwałym ściśnięciu kostki między piastą a obręczą (co znajduje potwierdzenie również w podwyższeniu wartości modułu Younga). Jednakże kształt i wielkość histerezy naprężenia w funkcji przemieszczenia pozostaje podobna, co pozwala sądzić, że materiał zachowuje swoje właściwości tłumiące. Zestawienie wartości modułu sprężystości podłużnej (moduł Young'a [MPa]) wyznaczonych metodą styczną w punkcie odpowiadającym odkształceniu  $\varepsilon = -25\%$ , uzyskanych w próbach ściskania przedstawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Zestawienie wartości modułów sprężystości poszczególnych próbek dla  $\varepsilon = -25\%$

Wartości modułu Younga E(-25%) [MPa]	
Próbka wyeksploatowana 1	33,5
Próbka wyeksploatowana 2	23,6
Próbka wyeksploatowana 3	22,5
Próbka nowa	17,7

Ze względu na to, że rozważania dotyczą głównie regeneracji eksploatowanego koła oraz na znaczącą zmianę wartości modułu Younga we wkładkach wyeksploatowanych w stosunku do wkładek nowych do modelowania przyjęto średnią wartość modułu Younga dla wkładek wyeksploatowanych. Ostatecznie przyjęto wartość 26,5 [MPa].

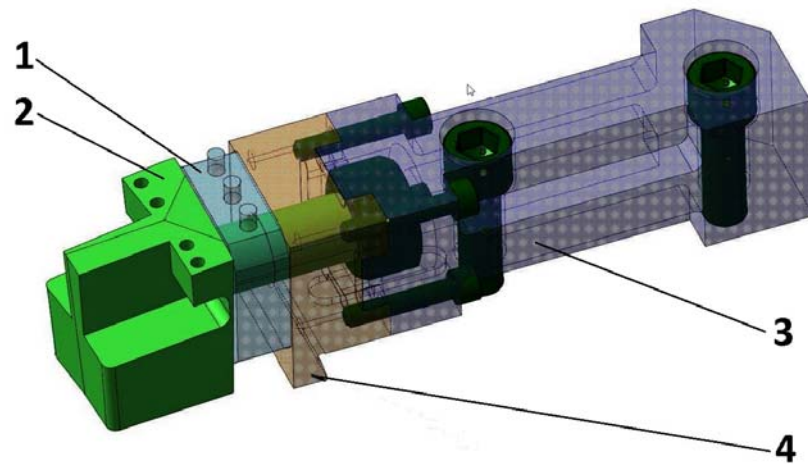
Kolejnym etapem pracy było określenie wartości sił skrawania podczas obróbki zestawów kół kolejowych z różnymi parametrami. Siły skrawania

zostały wstępnie wyznaczone analitycznie na podstawie wzorów uwzględniających geometrię narzędzia, warunki w których ono pracuje, parametry technologiczne procesu oraz materiał ostrza i materiał obrabiany. Jednak wartości sił skrawania określone w ten sposób nie dawały odpowiedzi na pytanie, czy praca przy tych parametrach będzie pracą stabilną i czy są to parametry o największej wydajności procesu. W związku z tym oraz z uwagi na dokładność odwzorowania modelu MES, a także w celu weryfikacji możliwości poprawy warunków skrawania poprzez zmianę parametrów obróbki została przeprowadzona weryfikacja obliczeń analitycznych. Weryfikację tą przeprowadzono podczas prób skrawaniowych w rzeczywistych warunkach pracy tokarki TUU 1250.

W celu przeprowadzenia pomiaru sił skrawania w warunkach rzeczywistej obróbki zestawu kołowego konieczne było zaprojektowanie i wykonanie narzędzia o takiej samej geometrii ostrza jak w przypadku narzędzi stosowanych w procesie regeneracji zestawów kołowych. To specjalne narzędzie wyposażone zostało w czujniki do pomiaru sił skrawania. Zastosowano trójskładowy siłomierz piezoelektryczny firmy KISTLER 9067. Na rysunkach 4.6 i 4.7 przedstawiono projekt specjalnej oprawki oraz zdjęcia wykonanego elementu po jego zmontowaniu.

Postać konstrukcyjna zaprojektowanej oprawki odpowiadała postaci konstrukcyjnej narzędzia stosowanego podczas obróbki na tokarce kołowej. Niezbędne zmiany w konstrukcji polegały na umożliwieniu wbudowania siłomierza pomiędzy część skrawającą i część chwytową narzędzia. Efekt końcowy osiągnięto poprzez rozdzielenie monolitycznego pierwotnie

narzędzia i wprowadzeniu siłomierza między wyżej wymienione elementy. Dodatkowo, wprowadzono element podporowy A (rys. 4.6.) umożliwiający dowolne odkształcenia części roboczej, co zapewniło swobodne wywieranie nacisków na siłomierz i prawidłowy pomiar wielkości mierzonych. Część skrawająca narzędzia ze względu na złożoną geometrię wymagała opracowania skomplikowanej technologii na centrum frezarskie sterowane w pięciu osiach (centrum frezarskie DMG DMU60 monoblock).



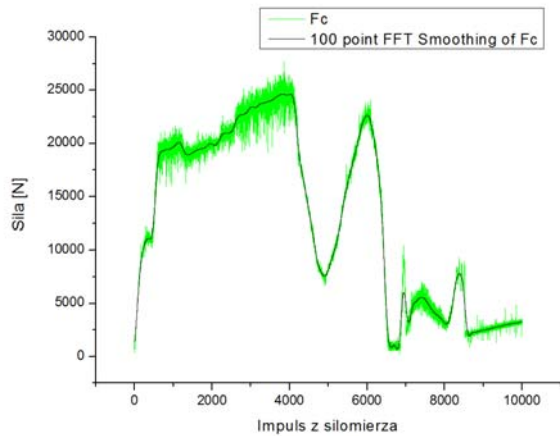
Rys. 4.6. Rysunek oprawki wyposażonej w siłomierz (1-siłomierz; 2-część robocza z gniazdami dla 2 płytek; 3- część chwytowa; 4- łącznik z gniazdem do mocowania części roboczej i siłomierza)

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].

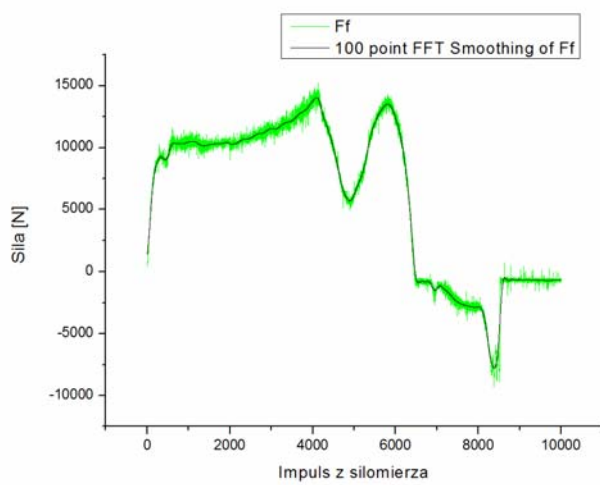
Zmierzone maksymalne wartości siły skrawania (przedstawione w formie wykresów na rys 4.8÷4.10) wprowadzono jako obciążenie zewnętrzne w modelu MES.



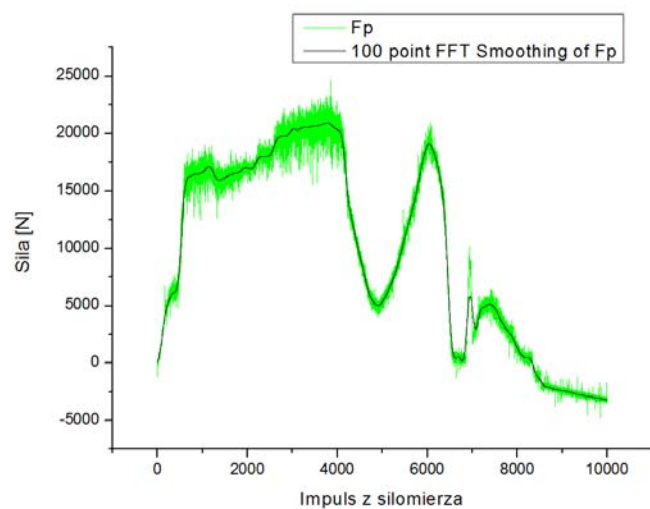
Rys. 4.7. Widok wykonanej oprawki z zamontowanym siłomierzem.



Rys. 4.8. Wykres pomiaru siły skrawania – składowej głównej  $F_c$



Rys. 4.9. Wykres pomiaru siły skrawania – składowej posuwowej  $F_f$



Rys. 4.10. Wykres pomiaru siły skrawania – składowej odporowej  $F_p$

Wstępne obliczenia systemem COSMOS/M zostały przeprowadzone dla obciążenia koła siłami przyłożonymi w jednej płaszczyźnie prostopadłej do osi koła, która przecinała obręcz koła w połowie jej szerokości. Model obliczeniowy zbudowany był z elementów skończonych typu solid o 8 węzłach, którymi zamodelowano piastę koła. Własności materiałowe tych elementów skończonych przyjęto zgodnie z normą dla tego typu elementów konstrukcyjnych (piasty kół kolejowych). Wkładki gumowe zostały zamodelowane elementami tego samego typu o właściwościach materiałowych odpowiadających właściwościom zmierzonym podczas badań wytrzymałościowych.

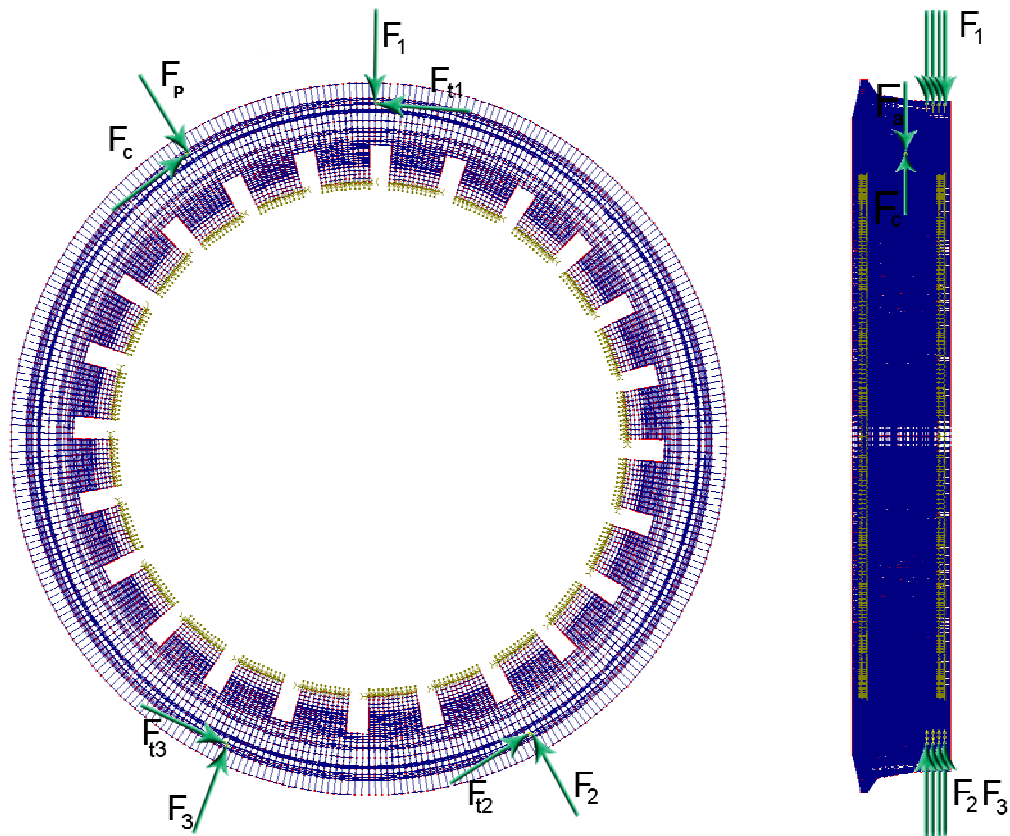
Ponadto w procesie modelowania wkładek wprowadzono napięcie wstępne wynikające z montażu tych elementów na wcisk w zestawie obręcz-wkładka elastyczna-piasta koła jezdnego. Napięcie wstępne uzyskano przez wymuszenie przemieszczenia powierzchni wkładek stykających się z piastą i obręczą o wartość wynikającą z różnicy między wymiarami geometrycznymi wkładki, a wymiarem przestrzeni między elementami metalowymi, co odpowiada rzeczywistym parametrom montażowym. Obręcz koła zamodelowana została elementami skończonymi tego samego typu, co wcześniej opisane elementy konstrukcyjne koła jezdnego o właściwościach materiałowych odpowiadających stali stosowanej na obręcze kół tramwajowych z wkładkami elastycznymi. Model obliczeniowy został utwierdzony na wewnętrznej powierzchni osadzenia piasty koła na osi zestawu kołowego. W procesie obróbki oś zestawu kołowego ustalana jest w kłach



obrabiarki, a napęd głównego ruchu skrawania przekazywany jest rolkami napędzającymi.

Opisany model obliczeniowy zastosowano do analizy wstępnej, którą przeprowadzono w płaskim stanie obciążenia działającym w płaszczyźnie prostopadłej do osi zestawu kołowego. Wstępnie przyjęto zerową wartość składowej siły posuwowej  $F_f$  przypuszczając, że ze względu na dużą podatność wkładek elastycznych mogą pojawić się dominujące wartości przemieszczeń obręczy w kierunku poosiowym komplikując analizę wyników.

Celem obliczeń wstępnych było oszacowanie udziałów odkształceń poszczególnych elementów koła jezdnego (obręczy, wkładek elastycznych, piasty) oraz ewentualne uproszczenie modelu obliczeniowego. Zgodnie z przewidywaniami wyniki obliczeń wykazały, że maksymalne przemieszczenia punktów piasty obrabianego koła są pomijalnie małe (wynoszące w przybliżeniu 1/100 promila maksymalnego przemieszczenia punktów obręczy) i w związku z tym zmodyfikowano modele MES stosowane w dalszych obliczeniach. Modyfikacja polegała na pominięciu elementów skończonych modelujących piastę, a utwierdzenie modelu zlokalizowane zostało na powierzchniach wkładek elastycznych mających kontakt z piastą koła (odebranie wszystkich stopni swobody). Zachowano przy tym wartości przesunięcia wewnętrznych powierzchni wkładek odpowiadających ich zaciskowi montażowemu (promieniowe przesunięcie powierzchni styku piasta – wkładka elastyczna o wartość 11 [mm]). Ostateczny model obliczeniowy MES oraz schemat obciążenia koła przedstawiono na rysunku 4.11.



Rys. 4.11. Model obliczeniowy MES oraz schemat obciążenia obrabianego koła

Na rysunku 4.11. zaznaczone siły  $F_1 = 60$  [kN],  $F_2 = F_3 = 25$  [kN] są siłami docisku rolek napędzających, siły  $F_p = 20$  [kN] i  $F_c = 25$  [kN] są siłami skrawania (odporową i główną), siły  $F_{t(1,2,3)}$  to siły napędzające koło (równoważące siłę skrawania  $F_c$ ). Przyjęto równomierne przekazywanie napędu przez poszczególne rolki, stąd wartości sił  $F_{t1} = F_{t2} = F_{t3} = 8,33$ [kN].

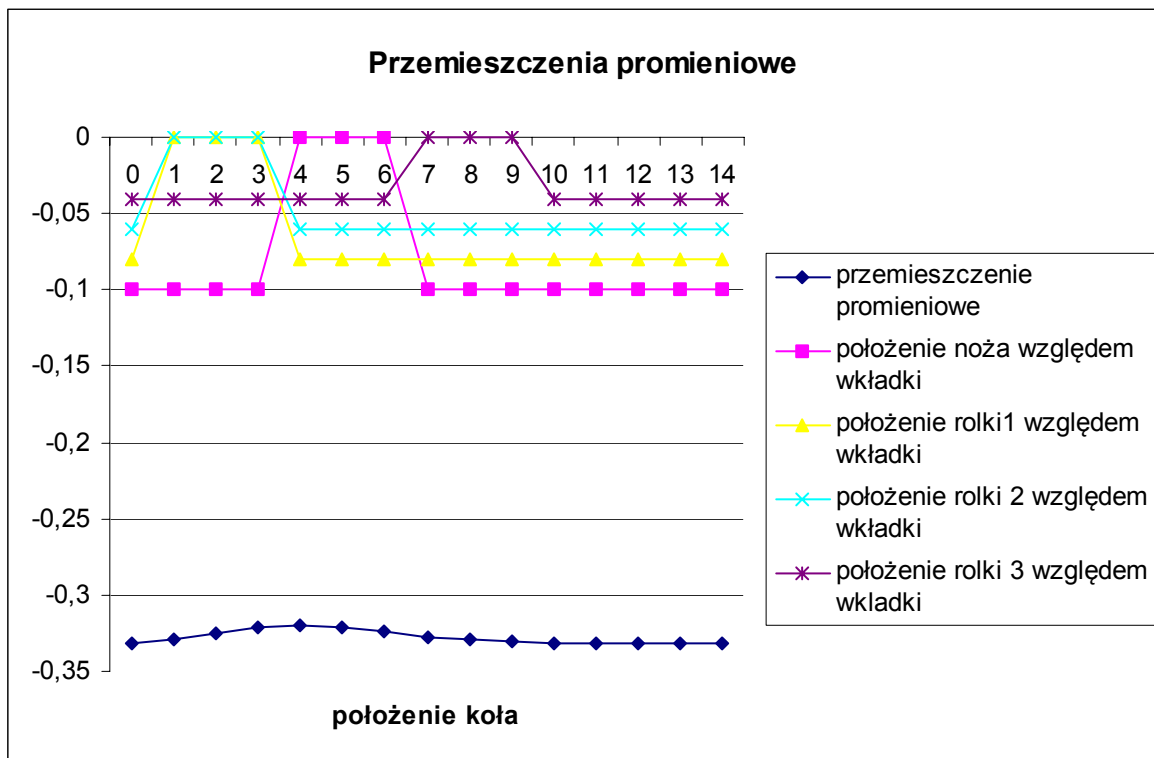
Kolejnym celem obliczeń wstępnych była analiza wpływu miejsca przyłożenia siły skrawania oraz miejsca docisku rolek napędzających w relacji od położenia wkładek elastycznych oraz przerw między nimi. Ponieważ na obwodzie kół rozmieszczonych jest 24 wkładki oraz tyle samo przerw między nimi to postawiono pytanie: czy zmiana punktu przyłożenia siły skrawania i wynikające z tego zmiany punktów docisku rolek napędzających

spowodowane obrotem koła w trakcie obróbki mają istotne znaczenie na przemieszczenia punktu obręczy oraz stan jej odkształcenia?. Obliczeń dokonano w piętnastu położeniach (numerowanych w kolumnie 1 tabeli 4.3 od 1 do 15 ), co odpowiada obrotowi koła w trakcie obróbki o jeden stopień. Określone zostały składowe przemieszczenia węzła elementu obręczy, w którym przyłożona została siła skrawania. Otrzymane w wyniku obliczeń wartości składowych przemieszczenia w punkcie przyłożenia siły skrawania zostały podane w tabeli 4.3.

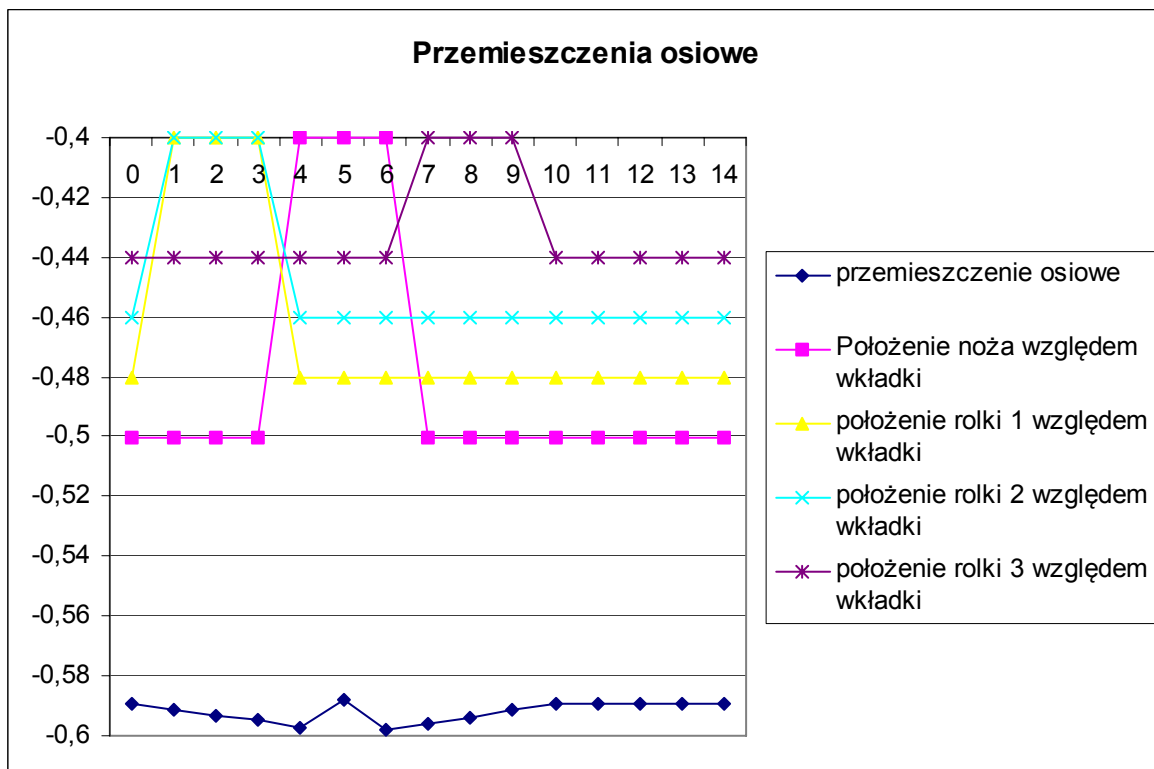
Tab. 4.3. Wartości składowych przemieszczenia węzła, w którym przyłożono siłę skrawania (gdzie: X- kierunek promieniowy, Y- kierunek obwodowy, Z- kierunek równoległy do osi zestawu)

Numer przypadku	$U_x$ [mm]	$U_y$ [mm]	$U_z$ [mm]
1	-0,332	-0,892	-0,589
2	-0,329	-0,892	-0,591
3	-0,325	-0,891	-0,593
4	-0,321	-0,891	-0,595
5	-0,320	-0,869	-0,597
6	-0,322	-0,888	-0,588
7	-0,324	-0,887	-0,598
8	-0,327	-0,888	-0,596
9	-0,330	-0,889	-0,594
10	-0,331	-0,889	-0,592
11	-0,332	-0,892	-0,589
12	-0,332	-0,892	-0,589
13	-0,332	-0,892	-0,589
14	-0,3322	-0,892	-0,589
15	-0,332	-0,892	-0,589

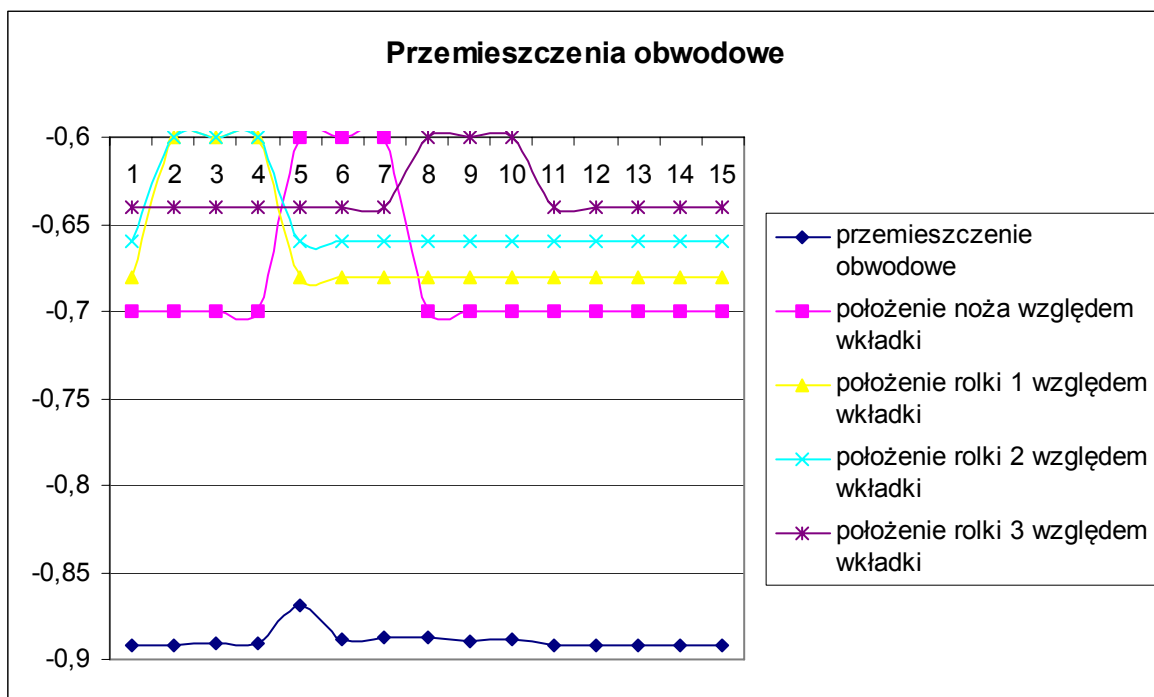
Na rysunkach 4.12÷4.14. przedstawiono wykresy składowych przemieszczenia w zależności od punktu przyłożenia siły skrawania, oraz punktów docisku rolek napędzających (piętnaście przypadków położenia).



Rys. 4.12. Przemieszczenie promieniowe węzła obciążonego siłą skrawania.



Rys. 4.13. Przemieszczenie węzła obciążonego siłą skrawania w kierunku równoległym do osi zestawu.

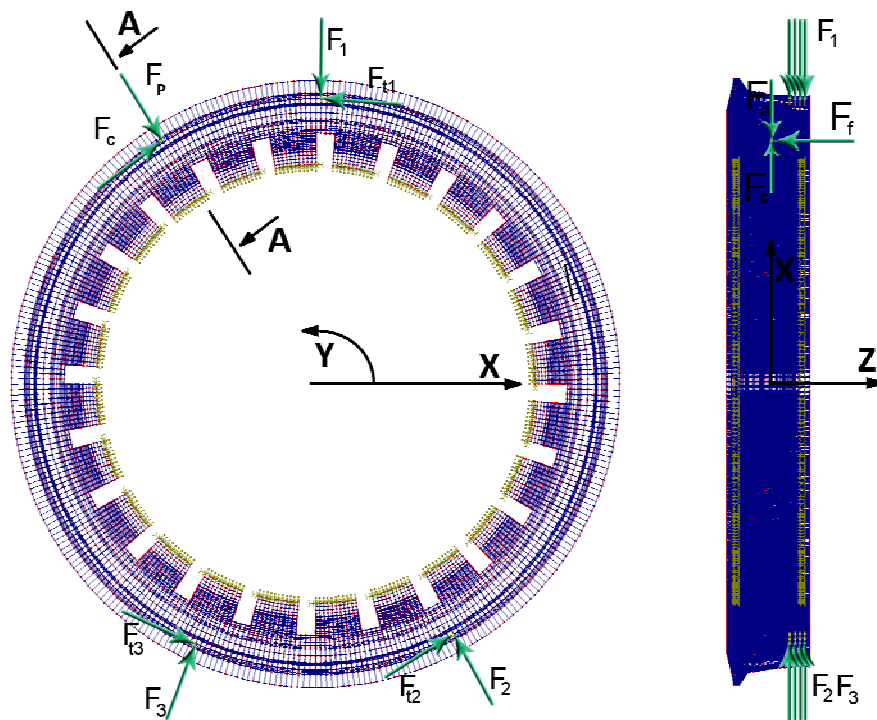


Rys. 4.14. Przemieszczenie węzła obciążonego siłą skrawania w kierunku obwodowym.

Zjawiskiem, które się pojawiło i stanowi pewien interesujący fakt jest to, że dla płaskiego stanu obciążenia (składowa posuwowa  $F_f = 0$ ) pojawiła się dość znaczna składowa osiowa przemieszczenia punktu przyłożenia siły skrawania. Wynika to z kształtu profilu obręczy, a bardziej szczegółowo z dużej asymetrii w przekroju poprzecznym obręczy, co skutkuje takim stanem odkształcenia.

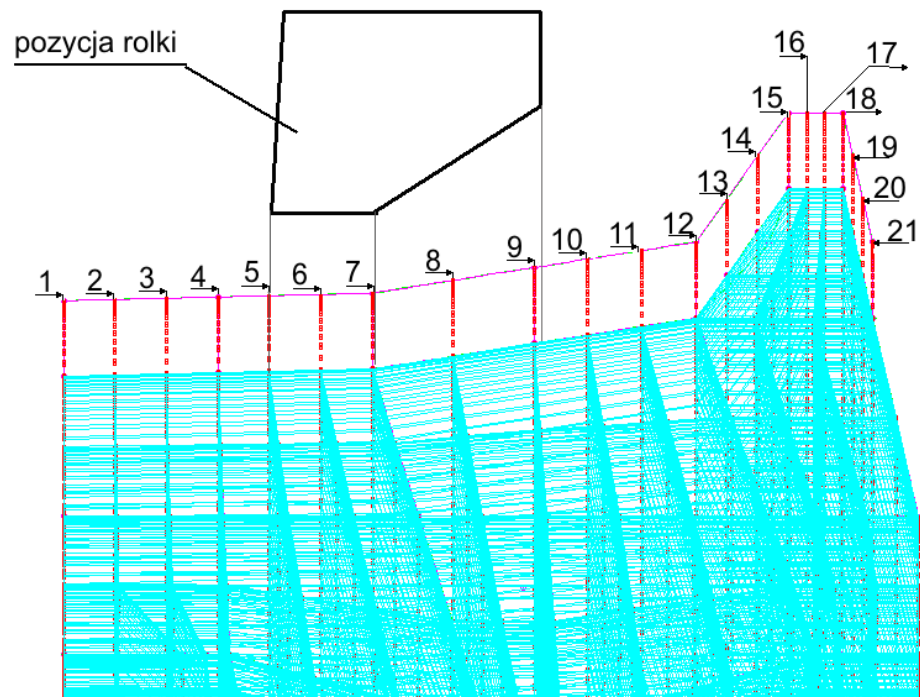
Wyniki obliczeń pokazują, że wahania przemieszczenia punktu obręczy koła w miejscu jej kontaktu z narzędziem skrawającym wywołane nieciągłością podparcia obręczy wkładkami elastycznymi, dla płaskiego stanu obciążenia, są nieznaczne i nie przekraczają wartości 0,03 [mm] dla obydwu składowych w kierunkach promieniowym oraz osiowym.

Jednakże mimo nieznacznych różnic w wahaniach przemieszczenia punktu obręczy koła można wyznaczyć położenie układu sił najbardziej niekorzystne dla procesu obróbki, tj. takie, w którym występują największe wartości składowych przemieszczenia. Ten przypadek został uznany za reprezentatywny i dla niego zostały przeprowadzone dalsze badania analityczne polegające na symulacji usuwania nadatku z obręczy koła. W tych obliczeniach uwzględniono już pełny stan obciążenia spowodowany procesem skrawania, a zatem uwzględniono wartość siły posuwowej na poziomie  $F_f = 14$  [kN]. Ponadto w modelu obliczeniowym uwzględniono również efekt usuwania nadatku oraz wynikającą z tego zmianę miejsca kontaktu rolek napędzających z obręczą obrabianego koła. Model obliczeniowy MES oraz szkic obciążenia koła obrabianego pokazano na rysunku 4.15.



Rys. 4.15. Model obliczeniowy MES oraz schemat obciążenia koła obrabianego.

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. Na rysunku 4.16. pokazano położenie noża skrawającego dla kolejnych 21 przypadków obliczeń oraz położenie rolki napędzającej, której położenie względem obręczy koła nie ulega zmianie (w kierunku osiowym), jednak z uwagi na usuwany materiał w procesie skrawania jej kontakt z obręczą zmienia się. Położenie dwóch pozostałych rolek dociskających oraz ich kontakt z obręczą jest taki sam jak pokazanej na rysunku.



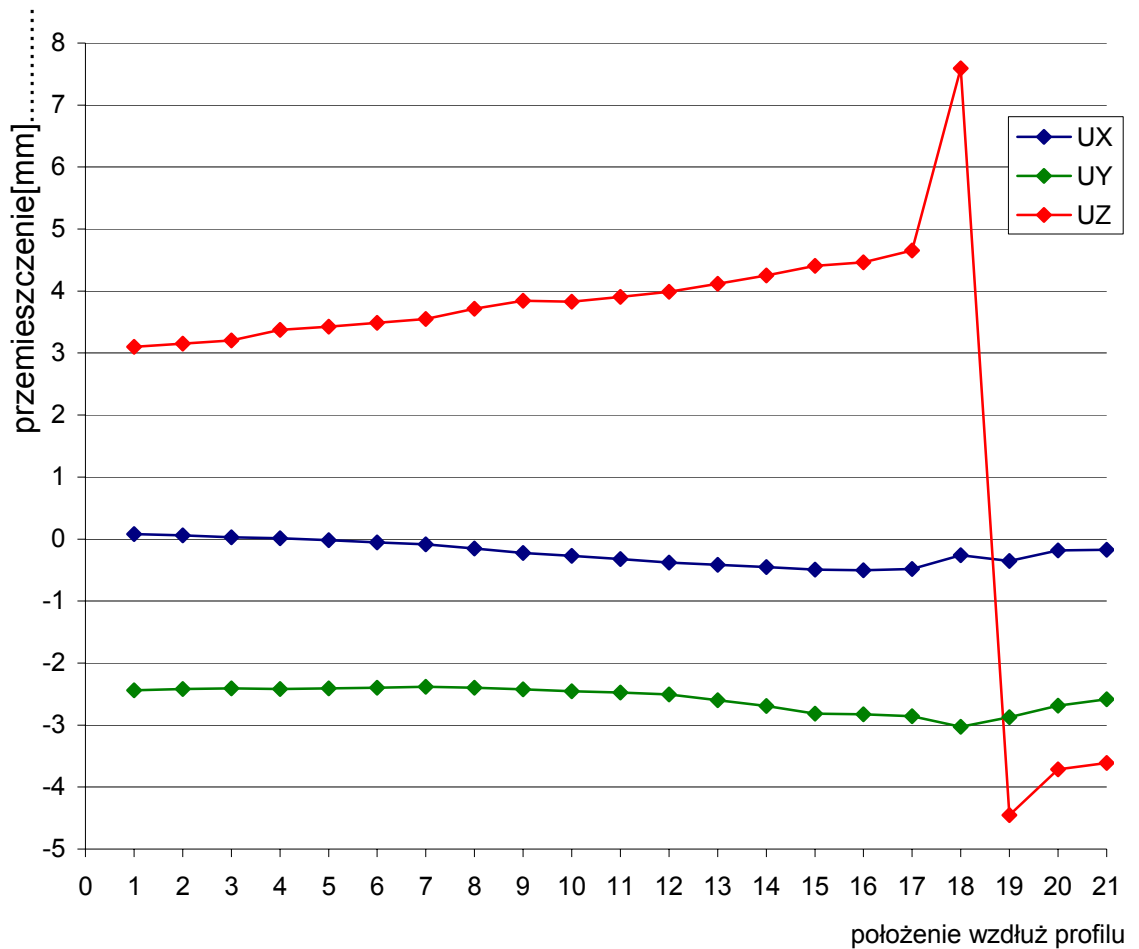
Rys. 4.16. Schemat 21 przypadków obliczeń dla kolejnych punktów przyłożenia siły skrawania podczas symulacji obróbki obręczy z pokazaniem położenia rolki napędzającej.

Realizując wyżej przedstawioną ideę zmiany kontaktu rolek napędzających podczas skrawania w miejscu ich styku z obręczą (na rys. 4.16 pozycje 6,7,8 i 9) przyjęto odpowiedni rozkład składowych sił docisku i tarcia w taki sposób, by suma sił działających na poszczególne węzły modelu była stała i równa przyjętej wartości  $F_1 = 60$  [kN],  $F_2 = F_3 = 25$  [kN]. Po usunięciu ostatniej warstwy spod walcowej części rolek zastosowano obciążenie punktowe  $F_1 = 60$  [kN],  $F_2 = F_3 = 25$  [kN] z dodatkowymi siłami osiowymi ( $F_{o1}=300$  [N];  $F_{o2}=F_{o3}=100$  [N]), które symulowały docisk ich stożkową częścią. Po przejściu tego newralgicznego momentu „skrawania” (usunięciu elementów skończonych spod stożkowej części rolki) od punktu 10 proces modelowano jak w przypadku obliczeń w punktach od 1 do 5. Trzeba nadmienić, że w rzeczywistym procesie skrawania ten moment też wyróżnia się pewnymi dość poważnymi problemami. Często dochodzi do poślizgu rolek napędzających, zwłaszcza w sytuacji punktowego styku stożkowego fragmentu powierzchni rolki z krawędzią powstałą w procesie skrawania.

Ponadto należy wyjaśnić, że w przypadkach od 12 do 21 zmieniano składowe siły skrawania stosownie do pochylenia obrabianego profilu. Szczególnie odnosi się to do składowej  $F_f$ , której w punktach oznaczonych numerami 19, 20 i 21 zmieniono zwrot na przeciwnie skierowany zgodnie z rzeczywistą zmianą wynikającą z procesu obróbki (ten fragment profilu jest obrabiany z posuwem z przeciwnym zwrotem).

Wyniki obliczeń składowych przemieszczenia w punkcie przyłożenia siły skrawania przedstawiono na rysunku 4.17.





Rys 4.17. Obliczone wartości składowych przemieszczenia w węźle obciążonym siłą skrawania (z zamodelowaniem efektu usuwania nadatku podczas skrawania)

Wartości składowych przemieszczenia węzła, do którego (modelowo) przyłożono siłę skrawania osiągają wartość kilku milimetrów – maksymalnie  $U_z = 7,815$  [mm]. Generalnie są to wartości bardzo duże i nie do zaakceptowania, ponieważ trudno sobie wyobrazić, by różnica pomiędzy wymiarem zadany, a uzyskanym w procesie obróbki była aż tak duża – przekracza to tolerancję wymiaru, co najmniej o rząd wielkości. Największe wartości składowej przemieszczenia mają miejsce w kierunku równoległym do osi zestawu kołowego (oś Z). Składowe przemieszczenia w kierunku

promieniowym jak i obwodowym są znacznie mniejsze, a ich wartości są również zależne od składowej osiowej przemieszczenia. Można to zaobserwować na wykresie (rys. 4.17.) między 18 i 19 przypadkiem obliczeń. Gwałtowna zmiana wartości składowej przemieszczenia w kierunku osi Z (aż o blisko 12 [mm]) spowodowana jest przeciwnym kierunkiem obróbki tego fragmentu obręczy. Za sprawą tej samej przyczyny również znacząco zmieniają się pozostałe dwie składowe przemieszczenia węzła w punkcie skrawania. Należy nadmienić, że składowa przemieszczenia w kierunku osi Y (składowa obwodowa) nie ma wpływu na dokładność obróbki. Stąd wniosek, że składowa poosiowa (oś Z) najbardziej wpływa na dokładność profilu koła i jej zmniejszenie stanowi główny cel uzyskania satysfakcjonujących efektów rozprawy doktorskiej.

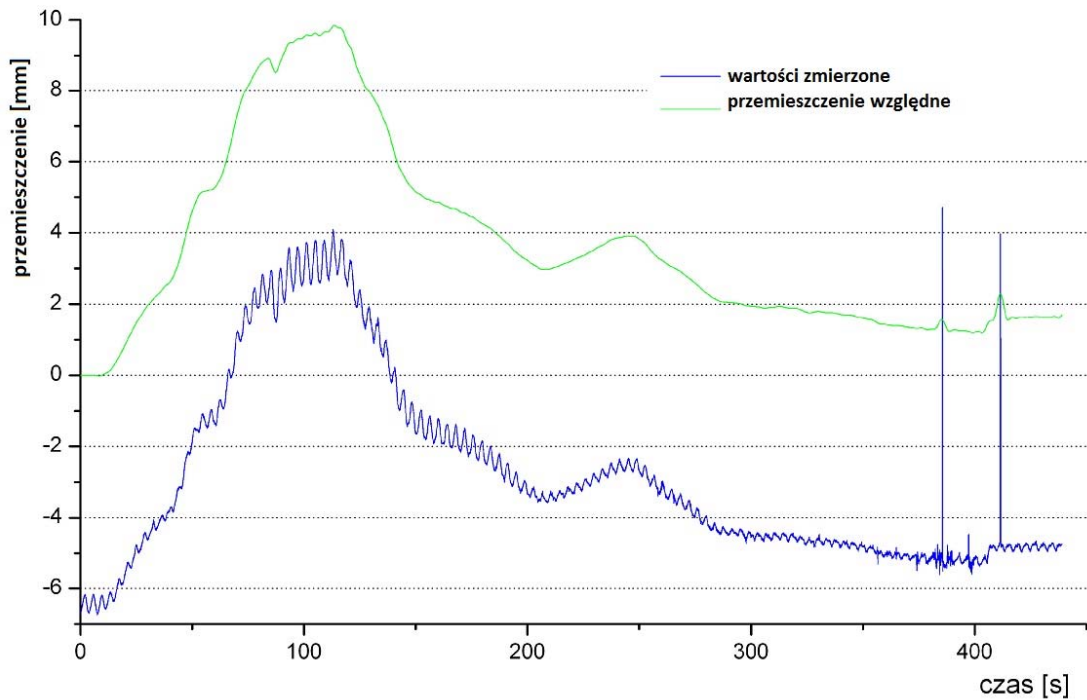
Wyznaczone metodą elementów skończonych wartości składowych przemieszczeń okazały się tak duże, że poddano w wątpliwość poprawność przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych. Podjęto zatem próbę weryfikacji otrzymanych wartości obliczeniowych poprzez pomiar rzeczywistych przemieszczeń w trakcie procesu obróbki kół z wkładkami elastycznymi na tokarce kołowej TUU 1250. Pomiar przemieszczenia obręczy podczas obróbki zestawu potwierdziły poprawność wyników przeprowadzonych symulacji analitycznych.

Opisując bardziej szczegółowo przeprowadzone badania, należy stwierdzić, że pierwsze próby pracą zakończyły się niepowodzeniem, ponieważ zastosowana obrabiarka była wyposażona w niewłaściwe rolki napędzające, przeznaczone do obróbki zestawów kół kolejowych o rozstawach

europejskim i rosyjskim, co uniemożliwiało poprawny napęd węższego zestawu tramwajowego. Rolki te miały kontakt jedynie z niewielką powierzchnią obręczy, tuż przy ich krawędziach zewnętrznych, co powodowało dociskanie obręczy w kierunku osiowym z dużą siłą oraz zgniatanie materiału obręczy przy kontakcie z rolką, co z kolei spowodowało powstanie twardego pierścienia na obręczy w miejscu przyłożenia noża tokarskiego w momencie rozpoczęcia skrawania. Ponieważ konstrukcja maszyny pozwala na szybką wymianę rolek napędzających postanowiono wykonać rolki, które pozwoliłyby na prawidłowe uchwycenie i napędzanie obrabianego zestawu tramwajowego. Po wykonaniu kompletu rolek przystąpiono do kolejnych prób skrawaniowych.

Przy prawidłowym uchwyceniu kół zestawu przez rolki napędzające zarejestrowane przemieszczenia obręczy w osi Z okazały się zbliżone do wartości przemieszczeń obliczonych podczas symulacji metodą MES, co pokazano na rys. 4.18.

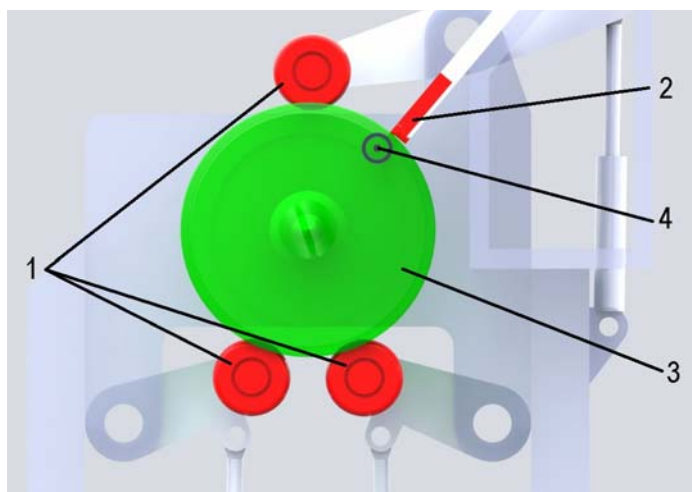
Przesunięcie koła w strefie skrawania zarejestrowane podczas obróbki przy głębokości 3mm bez zastosowanej podtrzymki



Rys. 4.18. Zmierzone wartości przemieszczeń obręczy w strefie skrawania podczas obróbki.

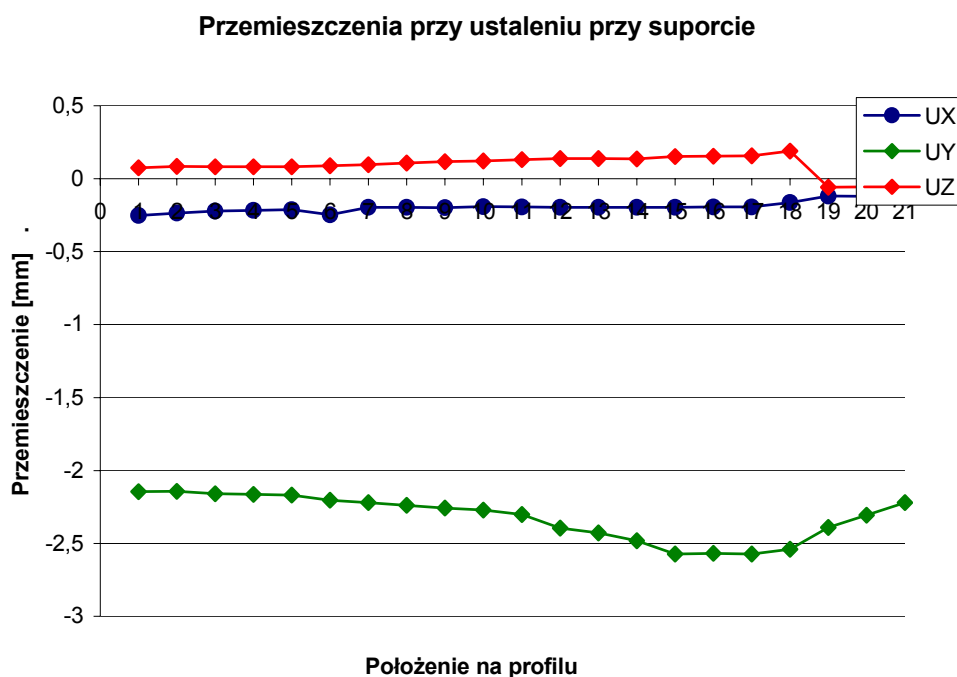
W ślad za obliczeniami oraz ich weryfikacją doświadczalną podjęte zostały prace mające na celu ograniczenie przemieszczenia osiowego obręczy obrabianego koła. Opracowano różne koncepcje podparcia, które zostały przeanalizowane z uwagi na możliwość ich zastosowania na obrabiarce oraz skuteczność tego podparcia w procesie obróbki. Pierwszym etapem było zamodelowanie MES odpowiedniego podparcia oraz przeprowadzenie obliczeń wyznaczających przewidywane przemieszczenia.

Zgodnie z zaleceniami technologicznymi najskuteczniejszym rozwiązaniem jest podparcie obrabianej obręczy w miejscu położonym jak najbliżej strefy skrawania (rys 4.19.).



Rys. 4.19. Schemat pierwszego wariantu podparcia koła podczas obróbki (1- rolki napędowe; 2- suport narzędziowy; 3- obrabiane koło; 4- punkt podparcia)

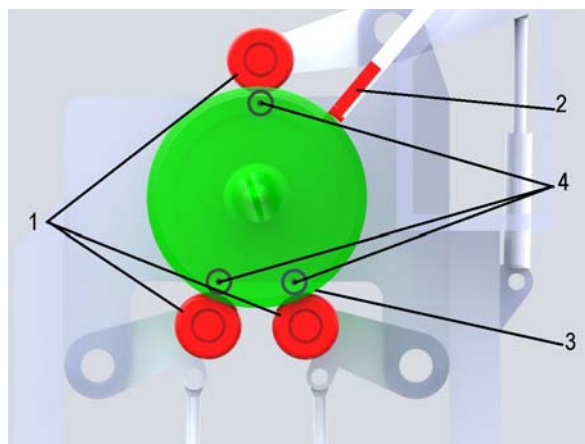
Modelując MES takie rozwiązanie oraz wyznaczając przemieszczenie węzła obręczy w miejscu przyłożenia siły skrawania stwierdzono, że składowe przemieszczenia zarówno wzdłuż osi zestawu jak i w kierunku promieniowym są sobie równe i nie przekraczają wartości 0,2 [mm] (rys 4.20.).



Rys. 4.20. Wartości składowych przemieszczenia w miejscu przyłożenia siły skrawania wyznaczone w punktach rozłożonych wzdłuż szerokości obręczy obrabianego koła

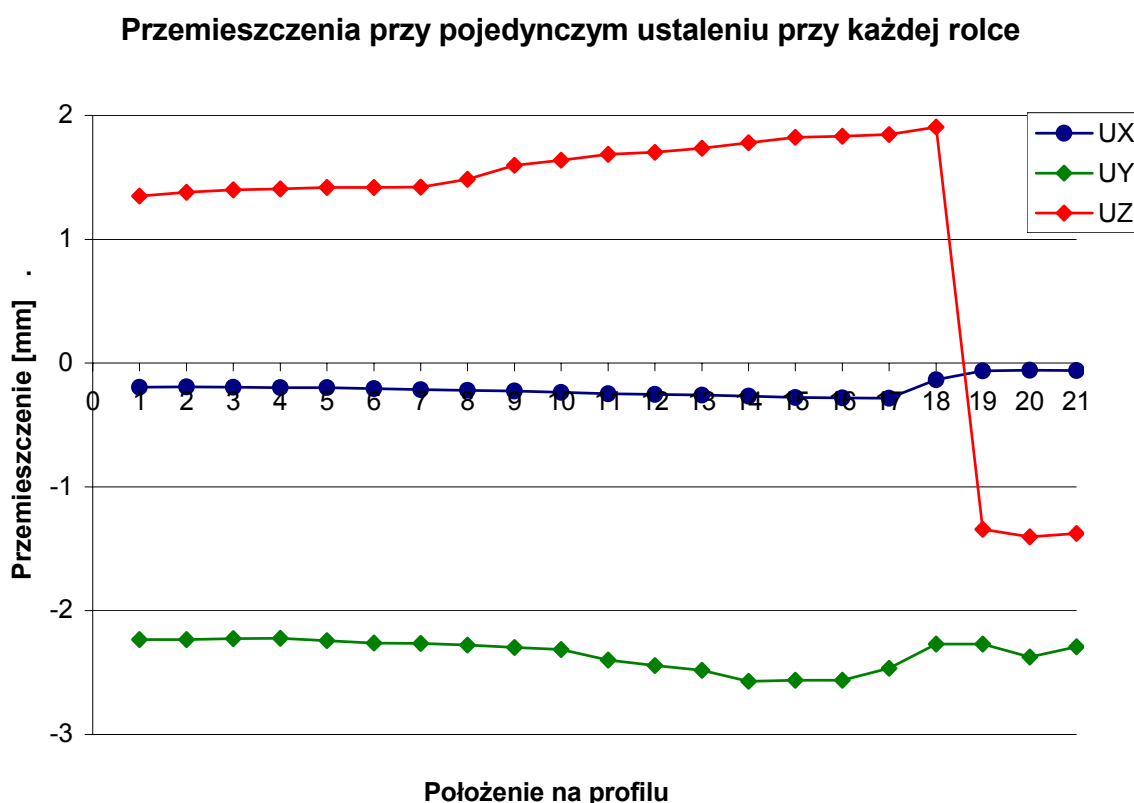
Otrzymane wartości można uznać za satysfakcjonujące, niestety jednak ze względów praktycznych rozwiązanie to nie jest możliwe do zastosowania. Wynika to z trudności zamocowania podtrzymki w miejscu pracy narzędzia – uwarunkowania przestrzenne oraz brak elementu konstrukcyjnego obrabiarki, do którego można byłoby utwierdzić podtrzymkę. Takie rozwiązanie wymagałoby wprowadzenia znacznych zmian konstrukcyjnych obrabiarki. Dodatkowo należy zauważyć, że wewnętrzna powierzchnia obręczy nie jest obrabiana. Wprowadzenie podtrzymki w niewielkiej odległości od pracującego narzędzia, dodatkowo, na nieobrobionej powierzchni mogłoby doprowadzić do gwałtownych przemieszczeń obrabianego elementu, co efekcie kolei mogłoby doprowadzić do zniszczenia ostrza noża tokarskiego.

Kolejnym rozpatrywanym wariantem rozwiązania było zastosowanie podparcia w pobliżu każdej z rolek napędzających (rys. 4.21.). Takie rozwiązanie zostało wzięte pod uwagę ze względu na konstrukcję tokarki kołowej. Rolki napędzające są ułożyskowane w tulejach, które osadzone są w korpusie obrabiarki.



Rys. 4.21. Schemat drugiego wariantu podparcia koła podczas obróbki (1- rolki napędzające; 2- suport narzędziowy; 3- obrabiane koło; 4- punkt podparcia)

Układ konstrukcyjny obrabiarki umożliwia zamocowanie podtrzymek właśnie na tulejach łożyskujących rolki napędzające. Po przeprowadzeniu obliczeń modelu MES analizowanego rozwiązanie stwierdzono, że wartości przemieszczenia obręczy w punkcie skrawania w kierunku osi zestawu kołowego znacznie przewyższają określone wartości dla poprzedniego wariantu rozwiązania. Przemieszczenia te osiągnęły wartości do 1,9 [mm] (rys.4.22).

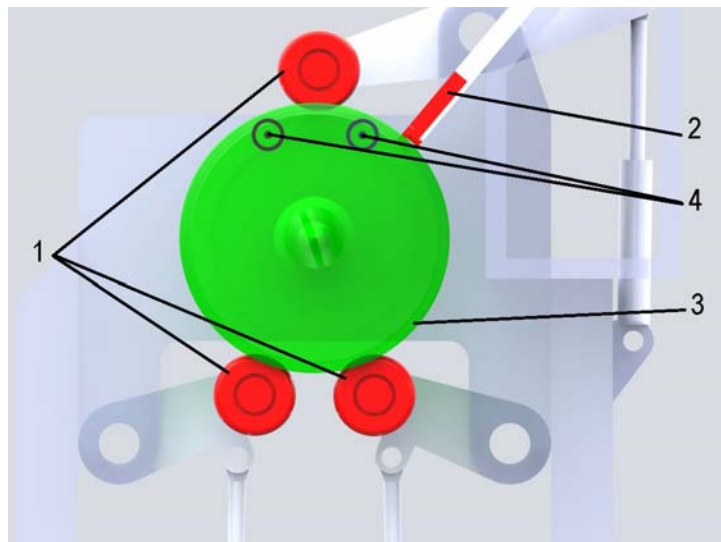


Rys. 4.22. Wartości składowych przemieszczenia w miejscu przyłożenia siły skrawania wyznaczone w punktach rozłożonych wzdłuż szerokości obręczy obrabianego koła przy zastosowaniu podtrzymek zamocowanych w pobliżu rolek napędzających.

Należy jednak zaznaczyć, że zamocowanie podtrzymek przy dolnych rolkach napędzających okazuje się trudne ze względu na pewne, dodatkowe funkcje, realizowane w procesie obróbki. Otóż, obrabiarka posiada uchylną podłogę służącą do wtaczania zestawu kołowego do strefy obróbki w celu

zamocowania zestawu kołowego w kłach. Podczas gdy zestaw jest mocowany dolne rolki służą do jego podniesienia z podłogi na wysokość kłów i w związku z tym zaistnieje kolizja uchylnej podłogi z podtrzymkami zamocowanymi na tulejach łożyskujących rolek napędzających.

Kolejny wariant rozwiązania został opracowany po konsultacjach z producentem tokarki kołowej. Jest to podtrzymka wyposażona w dwa elementy podpierające przedmiot obrabiany, które są umieszczone symetrycznie po obu stronach górnej rolki napędzającej (rys. 4.23.). Rozwiązanie to pozwala na proste zamocowanie podtrzymki do tulei łożyskującej górną rolkę bez konieczności zmian postaci konstrukcyjnej tokarki i nie generuje niebezpieczeństwa kolizji z innymi jej elementami układu nośnego.



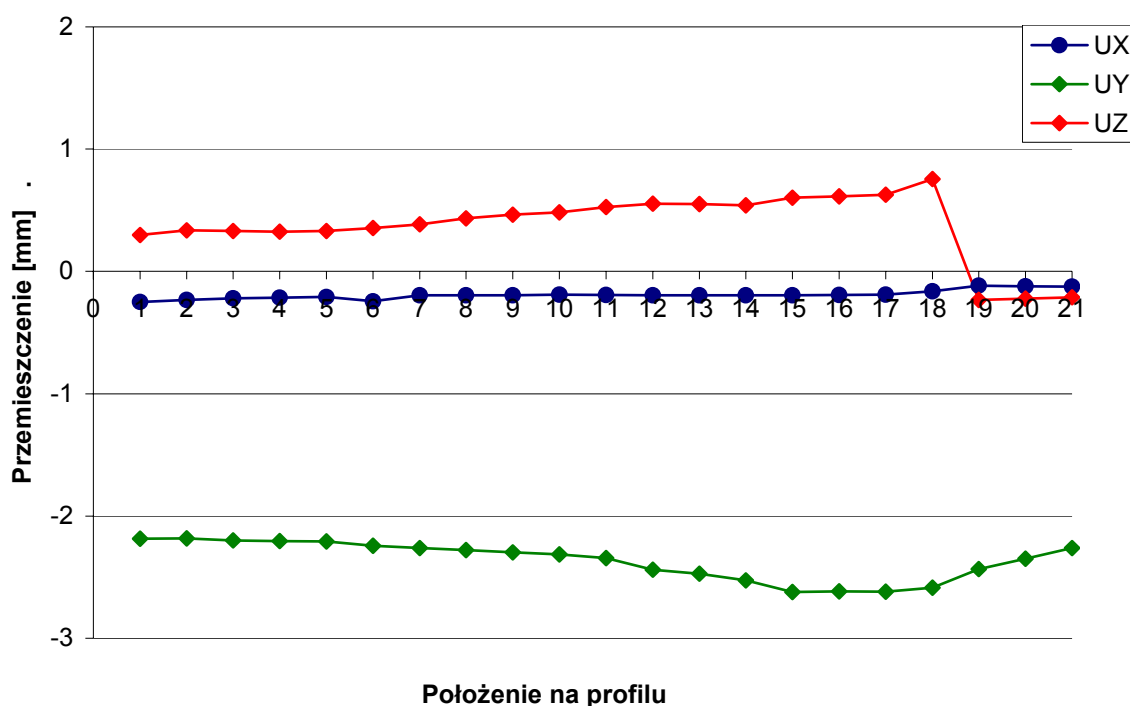
Rys. 4.23. Schemat trzeciego wariantu podparcia koła podczas obróbki (1- rolki napędowe; 2- suport narzędziowy; 3- obrabiane koło; 4- punkt podparcia)

Ponadto, podparcie obręczy nie w osi rolki napędzającej lecz w pewnej odległości od niej sprawia, że obręcz jest usztywniona bliżej strefy skrawania aniżeli w przypadku podparcia w osi rolki. Jak się okazało po zmontowaniu



podtrzymki podparcie zostało zrealizowane w połowie odległości między górną rolką napędzającą a suportem nożowym. Należy dodać, że proporcja odległości między suportem, a punktem podparcia oraz między punktem podparcia, a rolką napędzającą zmienia się w zależności od wartości promienia obrabianego koła.

**Przemieszczenia przy podwójnym ustaleniu przy górnej rolce**



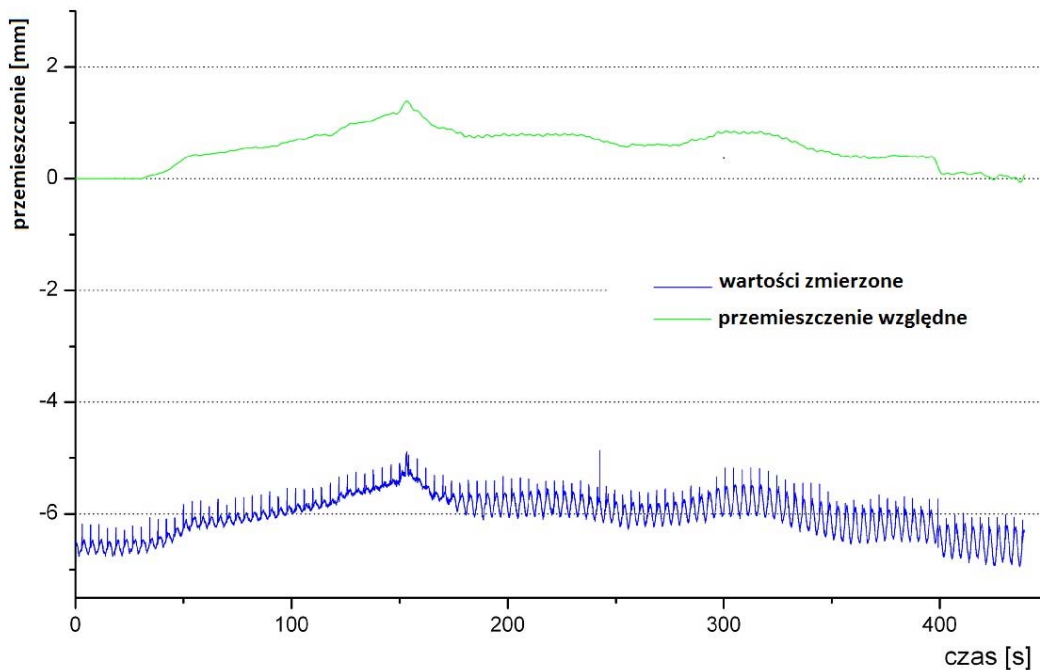
Rys. 4.24. Wartości składowych przemieszczenia w miejscu przyłożenia siły skrawania wyznaczone w punktach rozłożonych wzdłuż szerokości obręczy obrabianego koła przy symetrycznym podparciu obręczy z obu stron górnej rolki napędzającej.

Jak pokazano na rys. 4.24. wyznaczone wartości składowych przemieszczenia są znacznie mniejsze w porównaniu z przemieszczeniami w przypadku, w którym zastosowano podparcie przy wszystkich rolkach i osiągają wielkość do 0,76 [mm]. Należy tu jednak nadmienić, że w

przypadku symulacji MES założono maksymalne wartości sił skrawania, które zmierzono podczas obróbki na tokarce kołowej z napędem ciernym z głębokością skrawania 5 [mm] i posuwem 1,5 [mm/obrót]. Można przyjąć, że przy zastosowaniu zaproponowanego podparcia oraz obniżeniu parametrów skrawania możliwe jest zredukowanie składowych przemieszczenia do poziomu pozwalającego na uzyskanie wymaganej dokładności obróbki profilu jezdnego obręczy. Zgodnie z tym wariantem została wykonana podtrzymka, którą zastosowano w procesie obróbki.

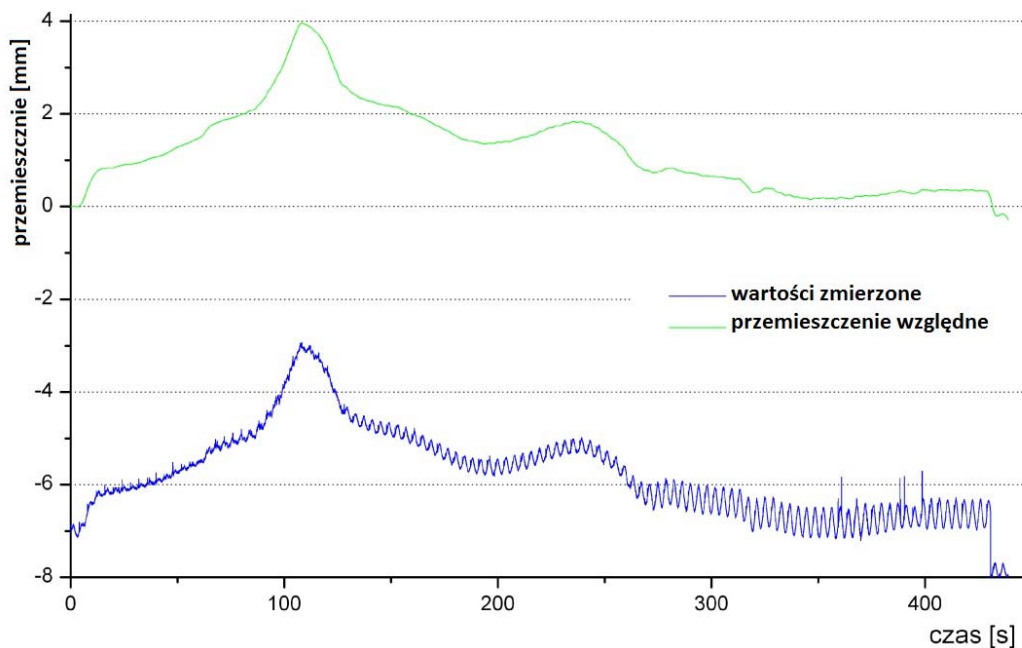
Przy próbach obróbki z podtrzymką okazało się, że jej zamocowanie do obrabiarki nie jest w stanie przenieść występujących sił i podtrzymka przesuwa się wraz z obrabianą obręczą, co miało decydujący wpływ na uzyskane wartości pomiarów. Mimo to uzyskane wartości przemieszczeń okazały się znacznie niższe od tych, które uzyskano bez zastosowania podtrzymki, co pokazują poniższe rysunki.

Przemieszczenie koła w strefie skrawania podczas obróbki przy głębokości 2mm z zastosowaną podtrzymałą

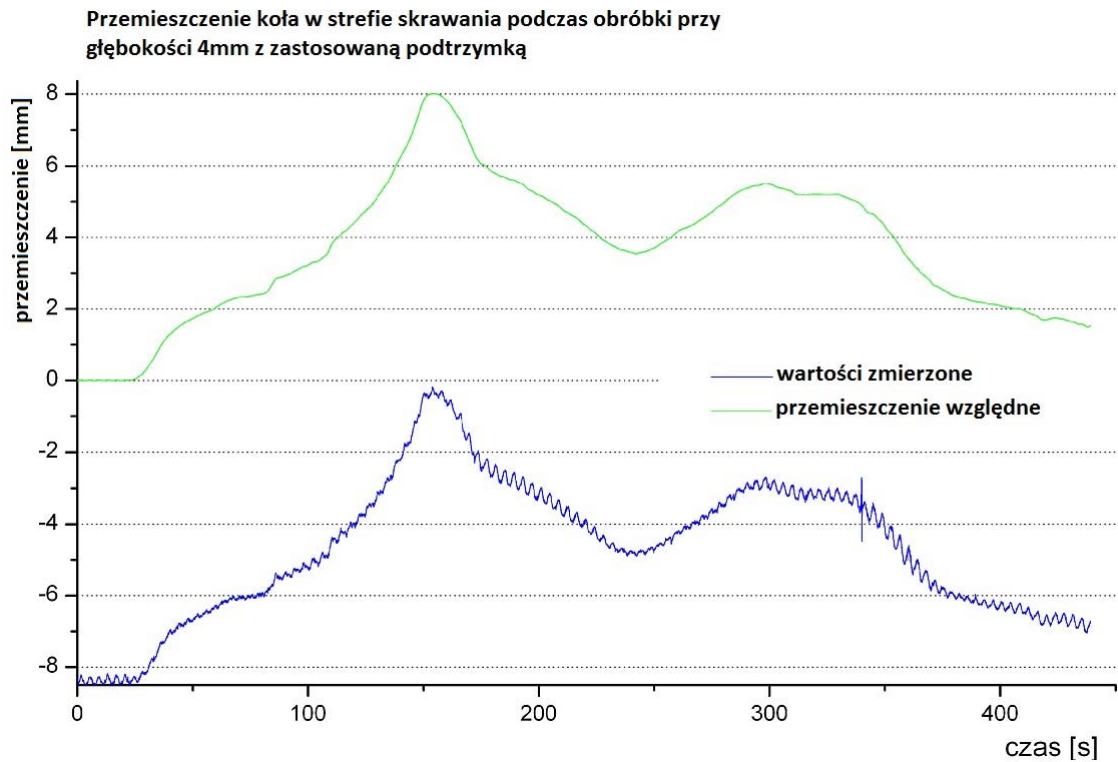


Rys. 4.25. Zmierzone wartości przemieszczeń obręczy w strefie skrawania podczas obróbki przy głębokości 2 [mm] z zastosowaniem podtrzymałą.

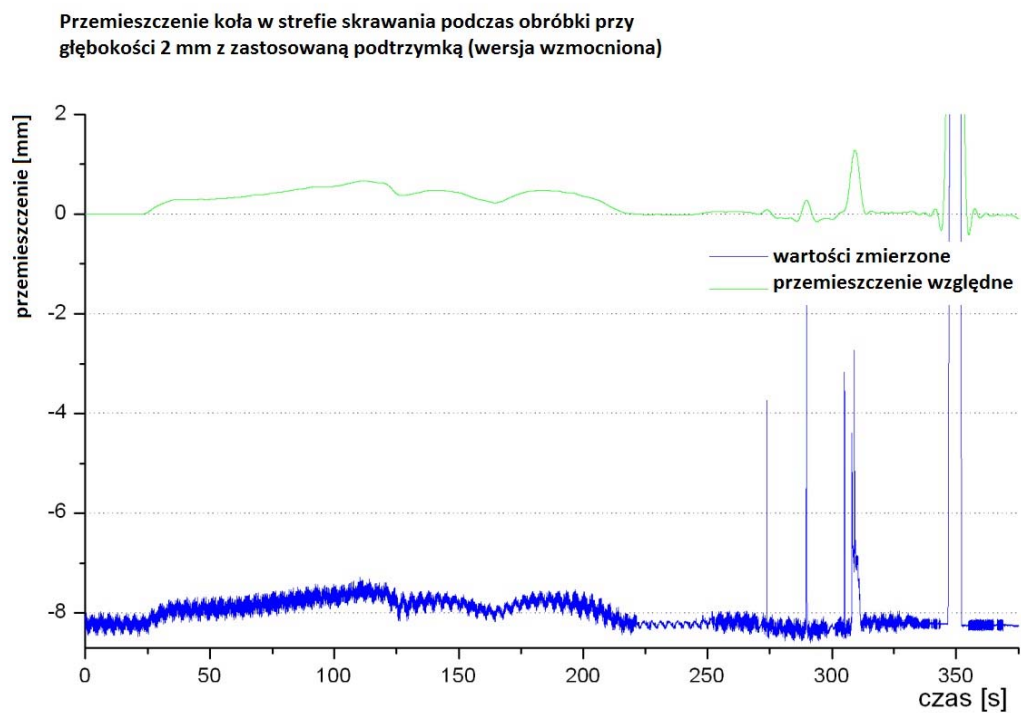
Przemieszczenie koła w strefie skrawania podczas obróbki przy głębokości 3mm z zastosowaną podtrzymałą



Rys. 4.26. Zmierzone wartości przemieszczeń obręczy w strefie skrawania podczas obróbki przy głębokości 3 [mm] z zastosowaniem podtrzymałą.

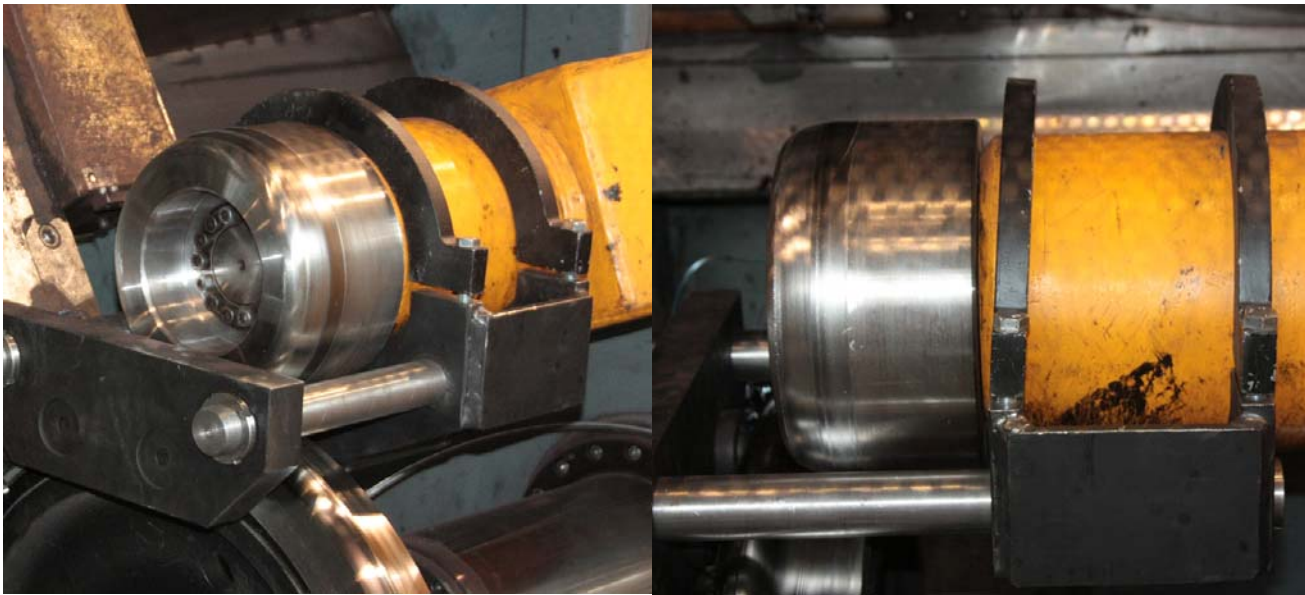


Rys. 4.27. Zmierzone wartości przesunięć obręczy w strefie skrawania podczas obróbki przy głębokości 4 [mm] z zastosowaniem podtrzymańki.

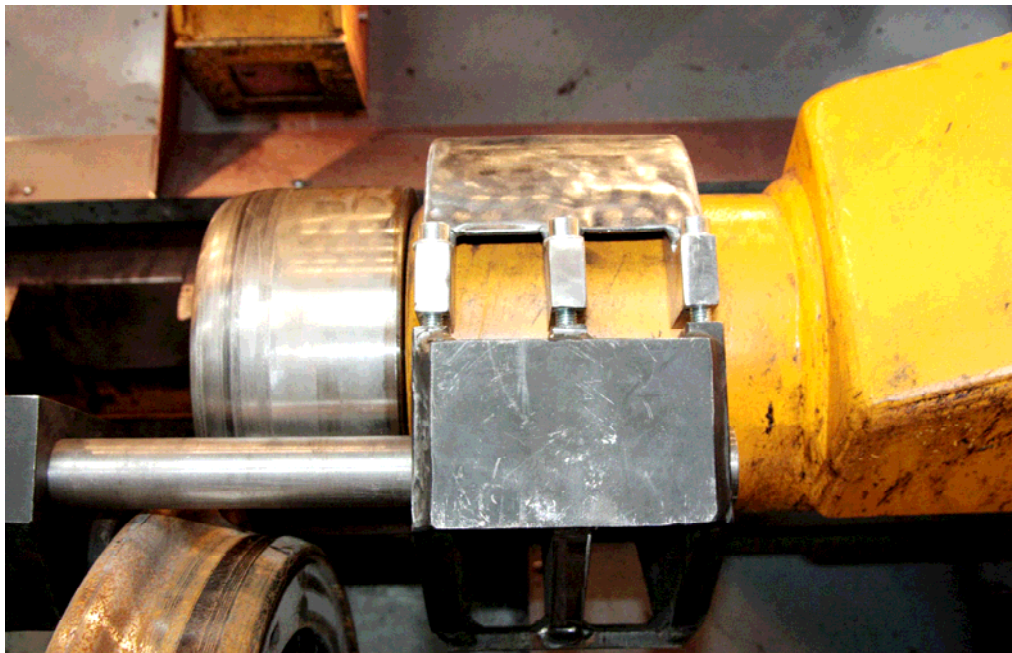


Rys. 4.28. Zmierzone wartości przesunięć obręczy w strefie skrawania podczas obróbki przy głębokości 2mm z zastosowaniem podtrzymańki.

W celu przeprowadzenia ostatecznej weryfikacji poprawności założenia o konieczności podparcia osiowego obręczy podczas obróbki, zdecydowano się na wykonanie jeszcze jednej serii prób pracą z podtrzymałą o ulepszonej konstrukcji – wprowadzono sztywniejsze mocowanie podtrzymały.



Rys. 4.29. Zdjęcia pierwszej wersji podtrzymały- z prawej strony widoczne przesunięcie mocowania.



Rys. 4.30. Zdjęcie poprawionego mocowania podtrzymały

Można zauważyć, że podczas obróbki z głębokościami skrawania 2 [mm] oraz 3 [mm] nie występowały gwałtowne zmiany wartości przemieszczenia obręczy. Praktycznie przemieszczenia te można kompensować odpowiednią modyfikacją programu obróbki.

Trzeba jednak zaznaczyć, że mimo wprowadzonych zmian konstrukcji podtrzymki podczas obróbki z głębokością 4 [mm] mocowanie jej nadal nie wytrzymało działających sił. Wynika z tego wniosek, że mimo zastosowania podtrzymki konieczne było zastosowanie innych (znacznie mniejszych) parametrów obróbki do toczenia kół tramwajowych niż przy obróbce zestawów kolejowych.

Ponadto, zastosowanie podtrzymki podczas obróbki zestawów kołowych powoduje dodatkowe trudności w obsłudze obrabiarki, a powierzchnia wykorzystywana do podparcia musi być wcześniej specjalnie przygotowana. W praktyce przemysłowej podczas regeneracji powierzchnia ta pozostaje nieobrobiona, ponieważ nie ma wpływu na poprawną pracę obrabianego koła.

Powyższe wnioski wskazują na to, że zastosowanie podtrzymki osiowej nie jest dobrym rozwiązaniem problemów pojawiających się podczas regeneracji profilu jezdnych zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi na tokarkach kołowych z napędem ciernym.

## **5. Opracowanie założeń konstrukcyjnych prototypu narzędzia frezarskiego do obróbki profilu jezdnych 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. Podczas obróbki obręczy nożem tokarskim powstaje wiór wstęgowy o dużym przekroju, który jest trudny do usunięcia, co z kolei stwarza dodatkowe kłopoty oraz nie sprzyja automatyzacji tego procesu obróbki. Zmiana narzędzia skrawającego w procesie technologicznym wymaga zastosowania urządzenia umożliwiającego napędzanie freza, które mocowane będzie do suportu obrabiarki kołowej. Ze względu na znacznie mniejszą średnicę kół tramwajowych w porównaniu z kolejowymi, mocowanie nawet dużego oprzyrządowania do suportu tokarki nie stanowi większego problemu.

Po przeanalizowaniu możliwych do zastosowania rozwiązań podjęto próbę opracowania konstrukcji narzędzia frezarskiego kształtowego do obróbki profilu jezdnego obręczy zestawów kołowych. Przy tak przyjętej koncepcji rozwiązania, kolejnym etapem działań było opracowanie założeń konstrukcyjnych prototypu narzędzia frezarskiego i w dalszej kolejności jego wykonanie.

Poważnym problemem obróbki jednym ostrzem kształtowym pełnego profilu o długości około 130 [mm] okazują się działające w takim przypadku bardzo duże siły skrawania wynikające z dużego przekroju warstwy skrawanej. Jest to szczególnie niekorzystne w analizowanym przypadku i niesie za sobą wysokie zapotrzebowanie na moc niezbędną do napędzania takiego narzędzia frezarskiego.

Wykonanie ostrza kształtowego umożliwiającego wykonanie pełnego zarys profilu koła jezdnego byłoby również trudne technologicznie oraz nieekonomiczne. O ile kształtowanie narzędzi z ostrzami wykonanymi ze stali szybko tnących hartowanych na wskroś jest możliwe przy zastosowaniu szlifierek narzędziowych, to narzędzia wykonane z węglików spiekanych lub cermetali, nie mogą być w prosty sposób kształtowane, chociażby ze względu na stosowanie powłok zmniejszających tarcie i polepszających właściwości skrawające ostrza. Trzeba jednak przyznać, że stal szybko tnąca nie jest materiałem optymalnym do obróbki przedmiotów wykonanych z materiałów twardych w związku z tym lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie ostrzy z węglików spiekanych.



W związku z tym podjęto decyzję o opracowaniu takiej konstrukcji narzędzia, które wykorzystywałoby ostrza handlowe, a zasada obróbki polegałaby na tym, że wykonanie pełnego obrotu narzędzia (lub przynajmniej jego części) daje w efekcie całkowity profil obrabiany. Takie rozwiązanie umożliwia napędzanie narzędzia przy pomocy wrzeciona o relatywnie niewielkiej mocy, a także daje możliwość wpływu na wartości sił skrawania (w pewnym stopniu) dzięki odpowiedniemu doborowi wzajemnego usytuowania ostrzy skrawających, a tym samym synchronizacji jednocześnie obrabianych fragmentów profilu jezdnego.

Obecnie na rynku znajduje się duży wybór gotowych ostrzy skrawających wykonanych z węglików spiekanych. Skład materiałowy tych ostrzy jest tak komponowany, by właściwości fizyczne i eksploatacyjne w jak największym stopniu były przystosowane do obróbki konkretnych materiałów obrabianych, w tym również możliwym jest znalezienie dużej gamy ostrzy do obróbki materiałów twardych i trudnoobrabialnych. Ze względu na masową produkcję i daleko idącą specjalizację producentów, są one relatywnie tanie.

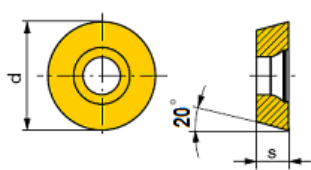
Podczas projektowania nowego ostrza, a w szczególności doboru materiału na takie ostrze, koniecznym staje się wzięcie pod uwagę wielu czynników mających wpływ na jego pracę. Często czynniki te wynikają z wielokrotnie przeprowadzanych prób skrawaniowych, które są wykonywane w celu uzyskania optymalnej geometrii ostrza oraz określenia parametrów skrawania spełniających stawiane kryteria obróbki konkretnego materiału obrabianego. Producenci narzędzi przeprowadzają takie badania stąd istnieje szeroki dostęp do ostrzy o optymalnej geometrii do obróbki

konkretnych materiałów z podanymi zalecanymi parametrami obróbki [11]. 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. Dodatkowo, wybrane płytki (rys.5.1.) są opatrzone przez producenta uwagą, że mają zastosowanie dla obrabiarek niewielkiej mocy, co jest korzystne z punktu widzenia wykonywanego projektu.


Użycie gotowych płytek skrawających produkowanych masowo sprawi, że koszt narzędzia będzie niższy, niż przy konieczności produkcji specjalnego narzędzia. Ponadto, po zużyciu płytek skrawających będzie możliwość wymiany tylko ostrzy, co również wpłynie na ostateczny rachunek ekonomiczny.

**REHX**

Opis	d mm	s mm
REHX 1003..	10	3,18
REHX 12T3..	12	3,97
REHX 1604..	16	4,76



WTN 1205



REHX

PG	WB
Nr artykułu	56 349 ...
	131

ISO

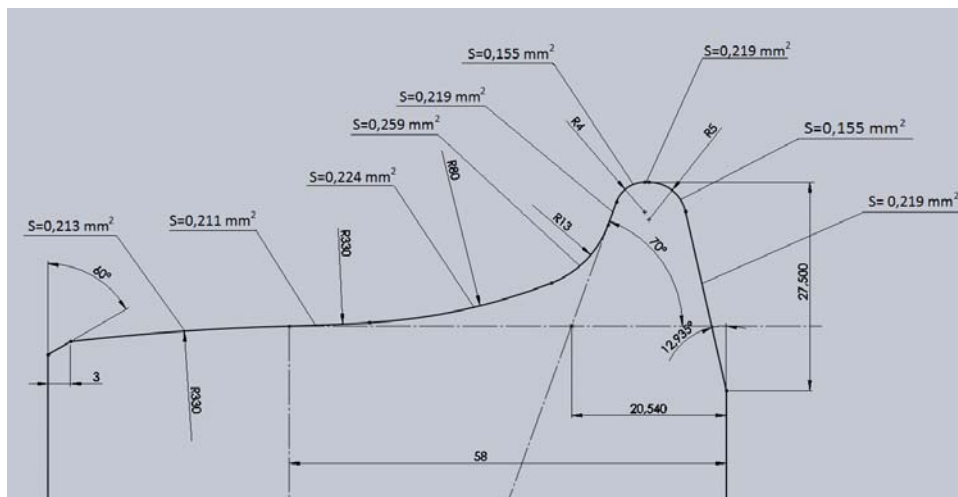
1003MOT	
12T3MOT	
1604MOT	

Stal	●
Stal nierdzewna	○
Żeliwo	●
Metale nieżelazne	○
Stopy żaroodporne	
Materiały hartowane	●

Rys. 5.1. Widok oraz dane wybranych płytek zamieszczone w katalogu producenta.

Zgodnie z przyjętą metodyką prowadzenia badań, precyzyjne określenie sił skrawania odgrywa szczególną rolę i w związku z tym przyjęto,

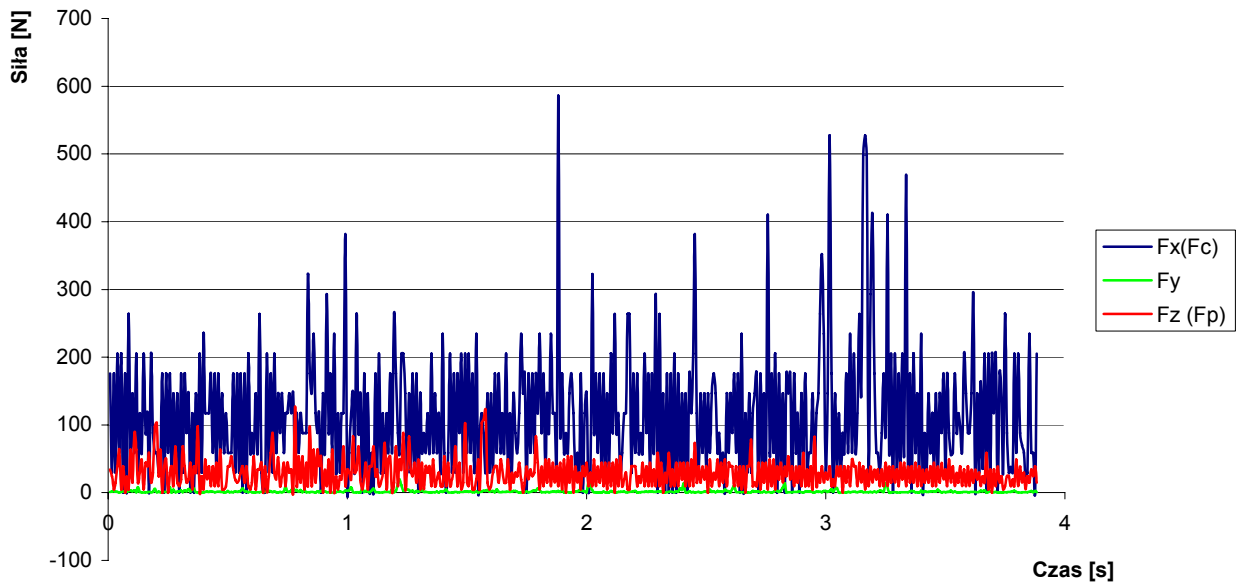
że najlepszym sposobem na ustalenie ich wartości będzie pomiar sił podczas obróbki. Pomiar taki pozwoli na ustalenie wartości sił dla różnych parametrów skrawania oraz różnych przekrojów warstwy skrawanej. Ma to szczególnie znaczenie ze względu na zmienność przekroju warstwy skrawanej w różnych częściach obrabianego profilu (rys. 5.2.). Profil jezdny jest krzywą złożoną z łuków i odcinków prostych, a więc istnieje możliwość wyznaczenia w sposób graficzny przekroju warstwy skrawanej dla poszczególnych odcinków profilu. Dzięki temu, po wykonaniu pomiaru sił dla różnych przekrojów warstwy skrawanej będzie możliwe oszacowanie siły wywieranej przez narzędzie skrawające w każdym miejscu obrabianego profilu.



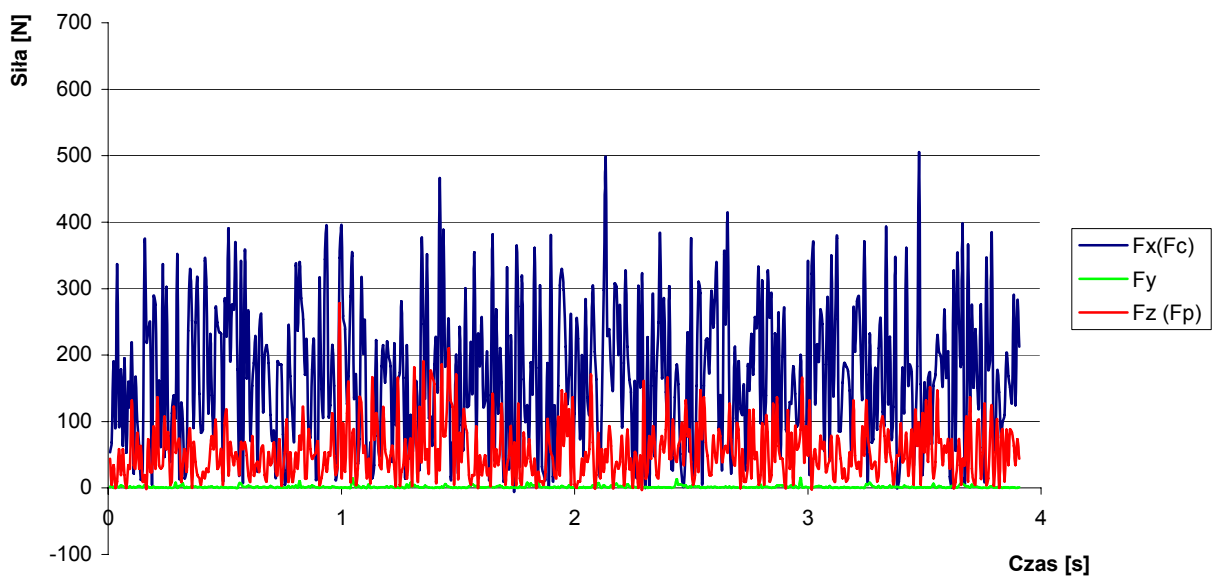
Rys. 5.2. Wielkość pola przekroju warstwy skrawanej przez płytkę okrągłą o promieniu  $R=5$  [mm] w różnych fragmentach profilu jezdnej obręczy.

Pomiary zostały wykonane z wykorzystaniem głowicy toroidalnej uzbrojonej w taki sposób, by każde ostrze pracowało oddzielnie. Frezowanie odbywało się bokiem freza w ten sposób, że wykonywany był rowek prostopadły do osi obrotu narzędzia.

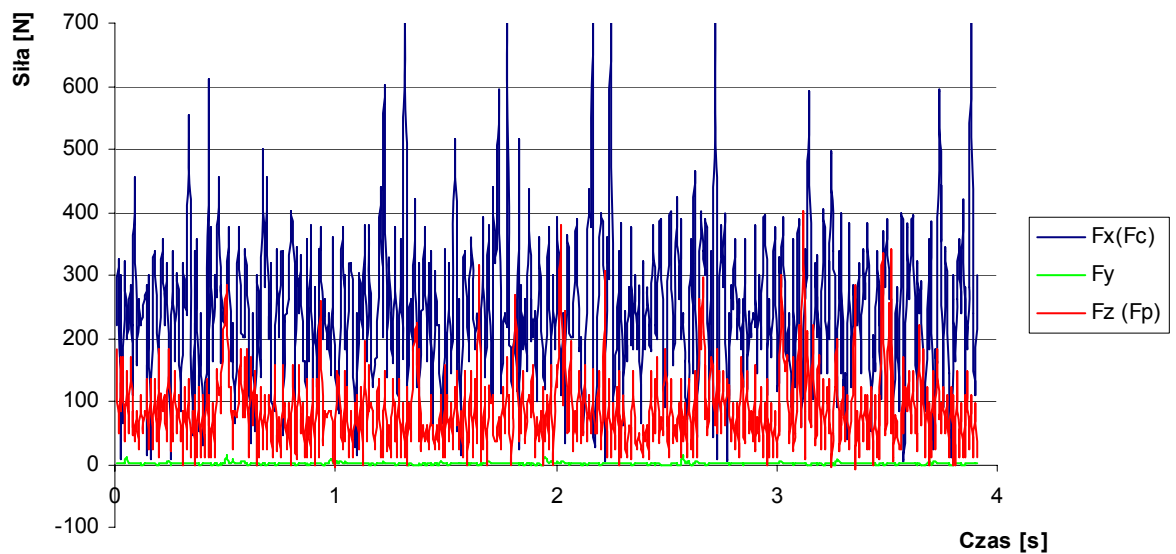
Zmierzone wartości sił dla przykładowych przekrojów warstwy skrawanej przedstawiono w formie wykresów na rys. 5.3÷5.5. Zmierzone wartości siły skrawania dla maksymalnego przekroju warstwy skrawanej nie przekroczyły wartości  $F_c = 390$  [N] i  $F_p = 190$  [N].



Rys. 5.3. Zmierzone wartości sił dla przekroju warstwy skrawanej  $A = 0,13$  [mm<sup>2</sup>]



Rys. 5.4. Zmierzone wartości sił dla przekroju warstwy skrawanej  $A = 0,22$  [mm<sup>2</sup>]



Rys. 5.5. Zmierzone wartości sił dla przekroju warstwy skrawanej  $A = 0,24 \text{ [mm}^2\text{]}$

Po określeniu wartości sił skrawania dla każdego z rozpatrywanych przekrojów warstwy skrawanej można określić zapotrzebowanie na moc projektowanego narzędzia. W rozpatrywanym przypadku maksymalna zmierzona siła skrawania przyjęła wartość:

$$F_{c \max} = 390 \text{ [N]}$$

Przy założeniu, że skrawanie będzie odbywało się maksymalnie przy użyciu 4 ostrzy (co wynika z geometrii przedmiotu obrabianego oraz zakładanej średnicy maksymalnej narzędzia  $D = 240 \text{ [mm]}$  umożliwiającej rozłożenie odpowiedniej liczby ostrzy na obwodzie freza). Maksymalny moment skrawania wynosi:

$$M_{s\max} = 4 * F_{c\max} * \frac{D}{2 * 1000} = 187 \text{ [Nm]}$$

Dla takiego momentu przy prędkości skrawania:

$$V_c = 120 \text{ [m/min]},$$

uzyskiwanej przy obrotach:

$$n = 160 \text{ [obr/min]},$$

maksymalna moc skrawania wynosi:

$$P_{\max} = \frac{M_{s\max} * n}{9550} \approx 3,13 \text{ [kW]}.$$

Daje to możliwość napędzania narzędzia frezarskiego wrzecionem o mocy nie mniejszej niż 3,2kW.

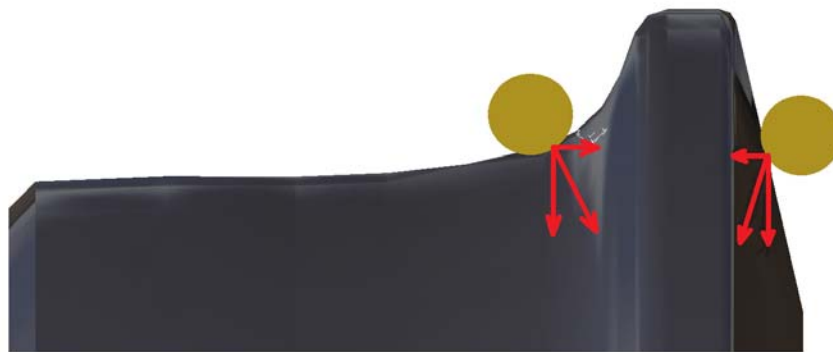
Kolejnym etapem było opracowanie konstrukcji korpusu narzędzia frezarskiego w celu zapewnienia odpowiedniego ustawienia płytek skrawających.

Długość całkowita obrabianego profilu wynosi

$$L \approx 129,7 \text{ [mm]}$$

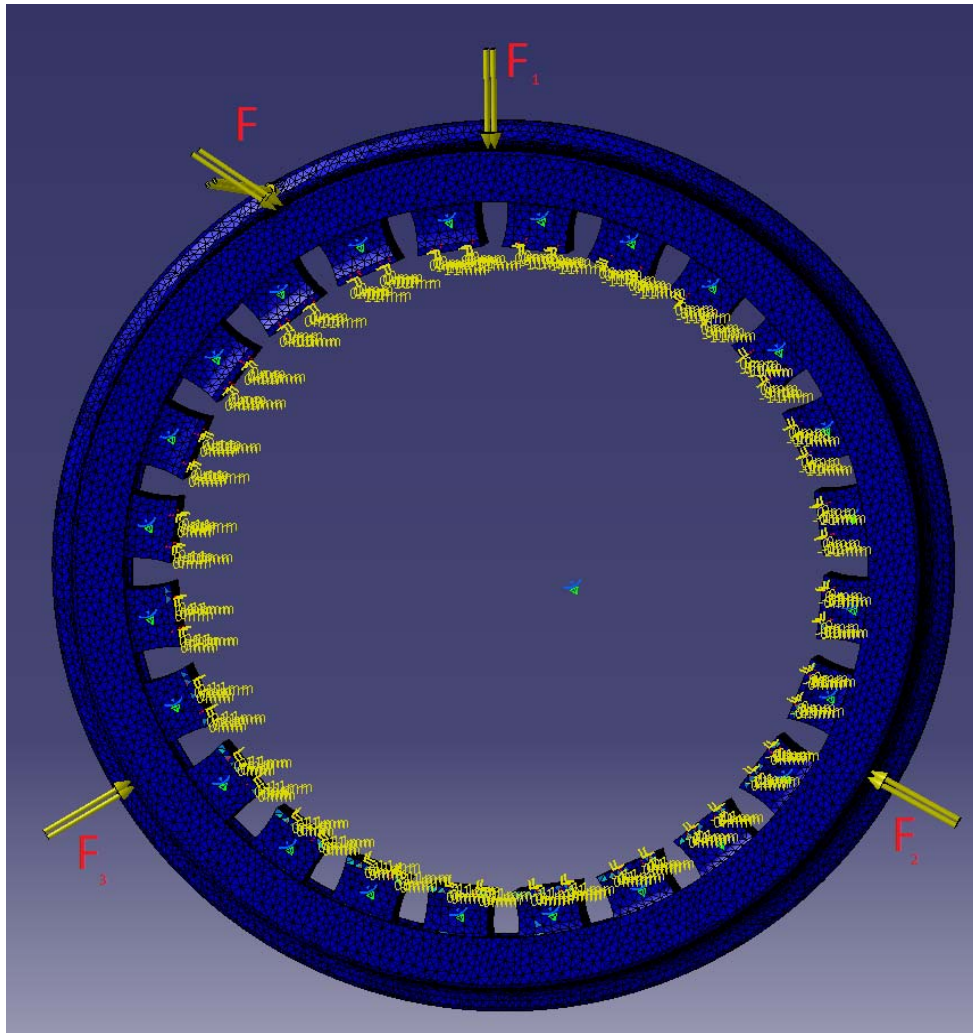
Ze względu na odwzorowanie powierzchni po obróbce tokarskiej z posuwem  $f = 2 \text{ [mm/obrót]}$  ostrza w korpusie narzędzia muszą utworzyć ślady obróbki w odległościach nie większych niż 2 [mm]. Uzyskuje się w ten sposób

65 pozycji dla ostrzy. Dodatkowo, należy przewidzieć ostrza w punkcie początkowym i końcowym profilu co daje 67 pozycji. Aby uzyskać możliwość kompensacji sił parami pracujących ostrzy należy więc użyć 34 par jednocześnie pracujących ostrzy.



Rys. 5.6. Kompensacja równoważenia sił skrawania przy obróbce dwoma ostrzami równocześnie.

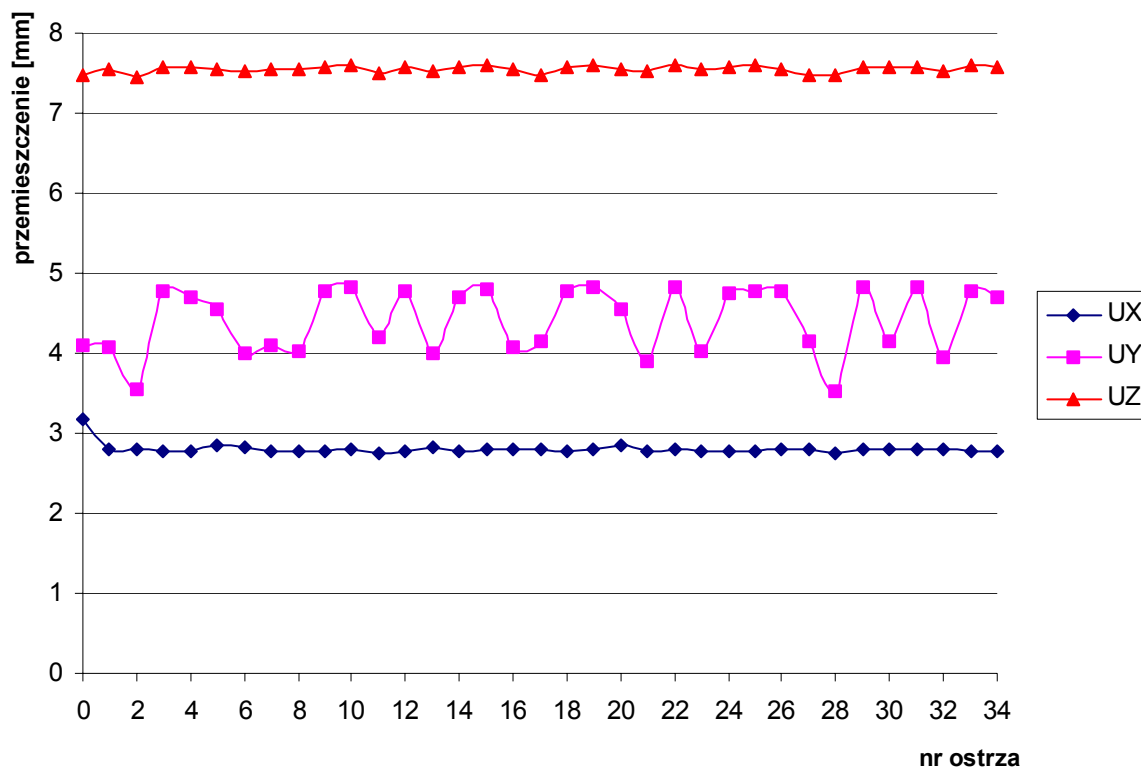
Biorąc pod uwagę powyższe rozważania opracowane zostały modele obliczeniowe MES procesu skrawania koła z wkładkami elastycznymi, z których każdy odzwierciedla pracę pojedynczej pary pracujących równocześnie ostrzy. Łącznie opracowano 34 modele obliczeniowe, z których przykładowy przedstawiono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Model MES koła poddany obciążeniu siłami:  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  – siły oddziaływania rolek napędzających,  $F$  – wypadkowa siła skrawania

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 .5.8.





Rys. 5.8. Przemieszczenie określone w punkcie przyłożenia siły skrawania dla każdej z pracującej pary ostrzy.

Konsekwentnie do poprzednio przedstawionych analiz, przemieszczenie określone zostało w układzie biegunowym, gdzie oś X jest kierunkiem promieniowym, oś Y jest kierunkiem obwodowym, a oś Z jest kierunkiem równoległym do osi obrotu zestawu.

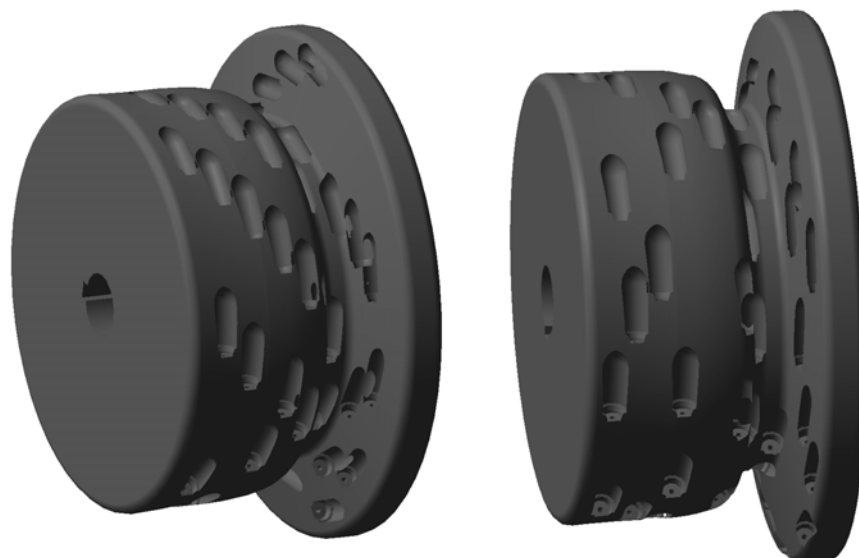
Na wykresie (rys.5.8.) w punkcie 0 określono przemieszczenie zarejestrowane bez przyłożenia siły skrawania, a obciążeniem układu były siły symulujące docisk rolek napędzających oraz wstępny zacisk wkładek elastycznych.

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]. Największą nieregularnością przemieszczenia wynikającą z przyłożenia siły skrawania charakteryzuje się składowa w kierunku obwodowym (oś Y), przy czym przemieszczenie w tym kierunku nie ma znaczącego wpływu na dokładność obróbki. Wyniki powyższych obliczeń posłużyły do określenia pozycji poszczególnych ostrzy w przygotowywanym do wykonania prototypie narzędzia frezarskiego do obróbki profilu jezdnych zestawów kołowych.

Wstępna koncepcja postaci konstrukcyjnej korpusu narzędzia opierała się na założeniu monolitycznego korpusu narzędzia z bezpośrednio w nim usytuowanymi gniazdami płytek skrawających (rys. 5.9.). Technologicznie, po wykonaniu zewnętrznego zarysu korpusu pozostałe operacje i zabiegi mogły być wykonane w jednym zamocowaniu pod warunkiem wykorzystania możliwości kinematycznych obrabiarki sterowanej w pięciu osiach.

Takie rozwiązanie daje możliwość osiągnięcia dokładnego położenia gniazd płytek w korpusie bez konieczności stosowania dodatkowych baz pośrednich. Jednakże generuje to kilka poważnych problemów.



Rys. 5.9. Widok korpusu narzędzia z bezpośrednio wyciętymi gniazdami dla ostrzy skrawających (wizualizacja 3D – system CATIA V5).

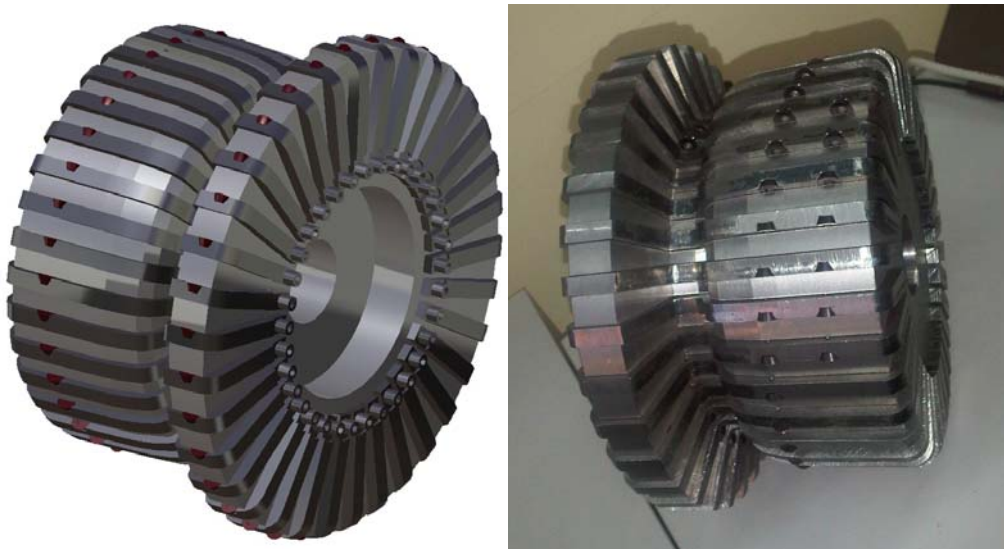
Po pierwsze jakiegokolwiek modyfikacje konstrukcji powodują konieczność wykonania całego korpusu narzędzia od nowa i jest to o tyle istotne, przy realizacji tej pracy, że prowadzenie dalszych eksperymentów z udziałem tego narzędzia może powodować konieczność jego odtwarzania od nowa z jednej strony lub ograniczać możliwości eksperymentowania z drugiej. Po drugie pojawiają się problemy natury technologicznej. Wykonanie gniazd w korpusie narzędzia wymaga wiercenia i frezowania otworów o niewielkiej średnicy (od 2,5 do 12 [mm]) i biorąc pod uwagę uwarunkowania geometryczne narzędzia frezarskiego pojawia się konieczność zastosowania bardzo smukłych wiertel i frezów.

Dodatkowo, należy stwierdzić, że wykonanie omawianego narzędzia frezarskiego w proponowanej postaci konstrukcyjnej jest możliwe tylko i wyłącznie z wykorzystaniem obrabiarki sterowanej w pięciu osiach. Pewnym

kolejnym mankamentem takiego rozwiązania konstrukcyjnego są ograniczenia dotyczące dowolności wzajemnego położenia gniazd ostrzy skrawających. Wynika to z konieczności usunięcia materiału znajdującego się nad gniazdem, co z kolei uniemożliwia umiejscowienie kolejnych gniazd w bezpośrednim sąsiedztwie.

Wady konstrukcyjne oraz trudność technologiczne wstępnej koncepcji rozwiązania spowodowały, że ostatecznie opracowano postać konstrukcyjną narzędzia ze specjalnymi 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 usuwa problem wzajemnego pozycjonowania płytek skrawających w każdej z jednocześnie pracujących par ostrzy.

Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest znacznie większa swoboda rozmieszczenia gniazd płytek, ponieważ kasety są wykonywane indywidualnie jako osobne części, a zatem nie występuje niebezpieczeństwo wzajemnego kolidowania gniazd w sąsiadujących rzędach.



Rys. 5.10. Projekt narzędzia z kasetami mocującymi ostrza skrawające (po lewej – wizualizacja 3D w programie CATIA V5; po prawej – zdjęcie wykonanego i złożonego korpusu narzędzia).

Kolejną zaletą wykonania takiego narzędzia jest możliwość wykorzystania konwencjonalnych obrabiarek skrawających, a nie jak we wcześniejszym rozwiązaniu (narzędzie z korpusem litym) konieczność zastosowania obrabiarki sterowanej w pięciu osiach.

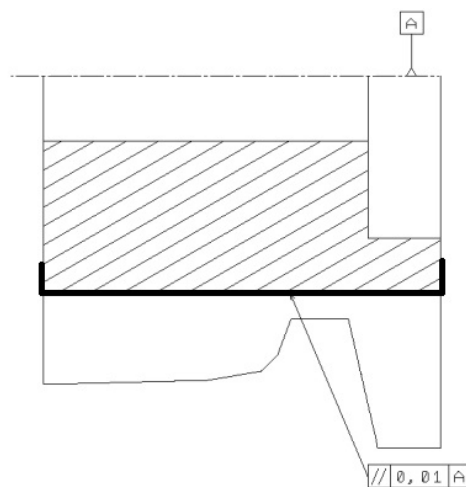
Podjęto decyzję o zaprojektowaniu korpusu narzędzia w formie narzędzia nasadzanego z otworem na trzpień o średnicy 40 [mm]. Tym sposobem nie występuje konieczność wykonania skomplikowanej części chwytowej narzędzia, a jednocześnie pojawia się możliwość przystosowania narzędzia do pracy z różnymi wrzecionami, poprzez dobór odpowiedniego trzpienia. Użycie trzpienia frezarskiego umożliwia też podparcie narzędzia z obu stron w podtrzymkach.

Korpusy narzędzi wykonywane są ze stali konstrukcyjnych, gwarantuje to łatwiejszą obróbkę, a jednocześnie obniża koszt wytworzenia. Na korpusy narzędzi bimetalowych stosuje się najczęściej stale konstrukcyjne węglowe St6, St7, 45 i 55, które dla uzyskania wyższych własności wytrzymałościowych poddawane są operacjom ulepszenia [14]. W wypadku narzędzia do obróbki korpusu z niewielkimi siłami skrawania możliwe jest wykonanie jego korpusu z materiału o twardości poniżej 35 HRC, dzięki czemu staje się możliwym pominięcie operacji obróbki cieplnej i wykonanie korpusu „na gotowo” techniką skrawania. Powstaje również możliwość ewentualnych modyfikacji korpusu narzędzia bez konieczności przeprowadzania obróbki cieplnej. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za użyciem materiału o takiej twardości jest fakt, że prototyp nie będzie używany do długotrwałej pracy, a jedynie do badań, przez co trwałość korpusu nie jest w tym wypadku warunkiem pierwszoplanowym. W związku z tym do wykonania prototypowego korpusu narzędzia frezarskiego użyto stali 45HMT o twardości do 32 HRC.

W celu ustalenia i zamocowania kaset mocujących płytki skrawające w korpusie narzędzia wykonano rowki o przekroju prostokątnym w taki sposób, by jedna ze ścian przechodziła przez oś obrotu korpusu. Takie ustawienie zapewni prawidłową geometrię ostrzy w układzie roboczym narzędzia.

Zewnętrzny zarys kaset mocujących przyjęto jako uproszczenie obrabianego profilu obręczy koła jezdnego odsunięty o 2 [mm] od powierzchni obrabianej. Wartość tego odsunięcia wynika przede wszystkim z potrzeby uzyskania odpowiednio dużej sztywności podparcia ostrzy skrawających, przy jednoczesnym swobodnym, bezkolizyjnym dostępie krawędzi

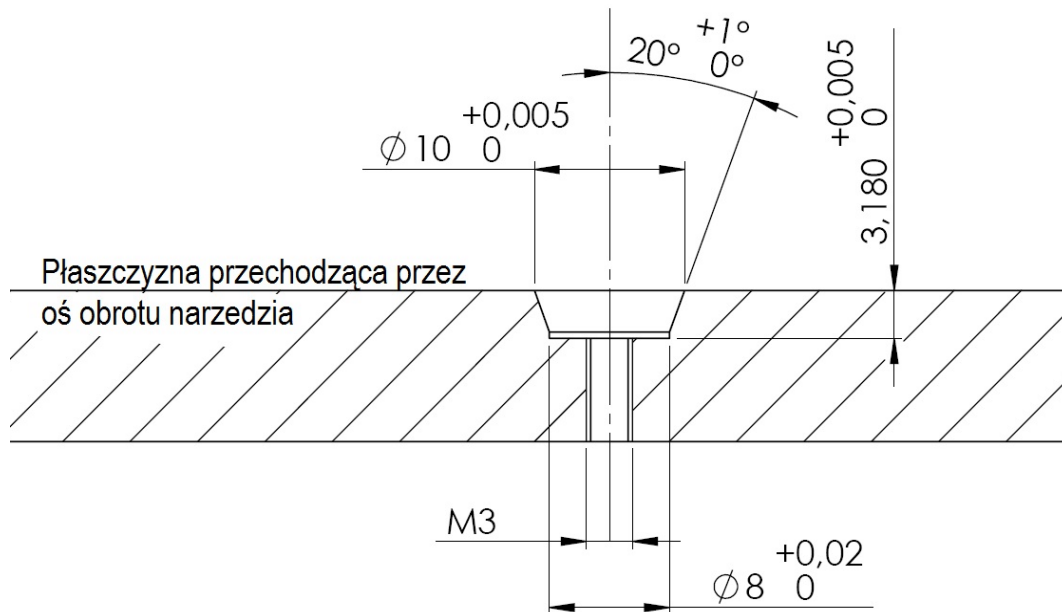
skrawającej ostrzy do powierzchni obrabianej. Ponadto, zarys kasety mocującej został wydłużony w relacji do szerokości obrabianej obręczy w celu pewnego podparcia płytek znajdujących się na końcach kasety jak również w celu prawidłowego zamocowania samych kaset w korpusie. Kasety ustalone zostały w korpusie narzędzia na powierzchni płaskiej po przeciwnej stronie do wyżej opisanego zarysu zewnętrznego. Do zamocowania kaset do korpusu wykorzystano płaszczyzny czołowe korpusu narzędzia.



Rys. 5.11. Przekrój korpusu narzędzia z oznaczonymi powierzchniami ustalającymi i mocującymi dla kaset.

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. Śruby mocujące są dostępne w sprzedaży łącznie z płytkami, a kształt ich łba zapewnia prawidłowe

mocowanie płytki w gnieździe przy wykorzystaniu specjalnego otworu centralnego płytki. W celu zapewnienia prawidłowej geometrii ostrza w układzie roboczym przyjęto założenie, że gniazdo powinno być tak spozycjonowane, by górna płaszczyzna płytki skrawającej (po osadzeniu) pokrywała się z płaszczyzną zawierającą oś obrotu narzędzia (rys. 5.12.).



Rys. 5.12. Wymiary i pozycja gniazda płytki skrawającej

Przedstawione założenia konstrukcyjne narzędzia frezarskiego gwarantują między innymi również 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.



## **6. Wykonanie prototypu narzędzia frezarskiego do obróbki profilu jezdnych kół tramwajowych.**

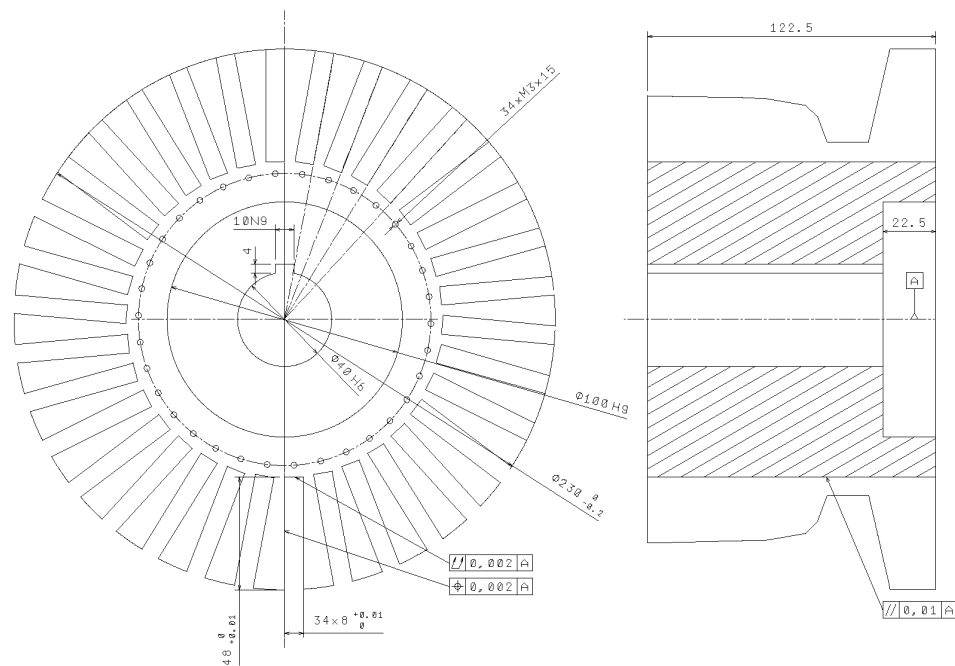
Na podstawie opracowanych założeń konstrukcji narzędzia frezarskiego do obróbki profili jezdnych kół tramwajowych oraz przeprowadzonych analiz obliczeniowych wytworzony został prototyp narzędzia. W ramach dalszych prac zaplanowano przetestowanie wykonanego prototypu narzędzia pod kątem weryfikacji postawionych założeń, w tym w szczególności spełnienia założenia o powstaniu w trakcie obróbki takiego układu sił skrawania, który umożliwi obróbkę zestawu kołowego z wkładkami elastycznymi bez konieczności stosowania dodatkowych podtrzymek.

Budowa prototypu wymagała wykonania korpusu narzędzia oraz kaset mocujących płytki po czym prototyp został zmontowany i uzbrojony w ostrza.

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. Rowki te zostały wykonane frezem tarczowym do rowków wpustowych z wymaganą dokładnością. Kasety zostały zamocowane do płaszczyzny czołowej korpusu narzędzia, która jednoznacznie pozycjonowała położenie posłowe. Ze względu na osadzenie kaset w rowkach i oparcie o ich dno to taki sposób mocowania nie powoduje przenoszenia sił skrawania przez śruby mocujące, a jedynie zabezpiecza przed niekontrolowanym przemieszczeniem kaset. Aby zachować geometrię płytek skrawających w układzie roboczym

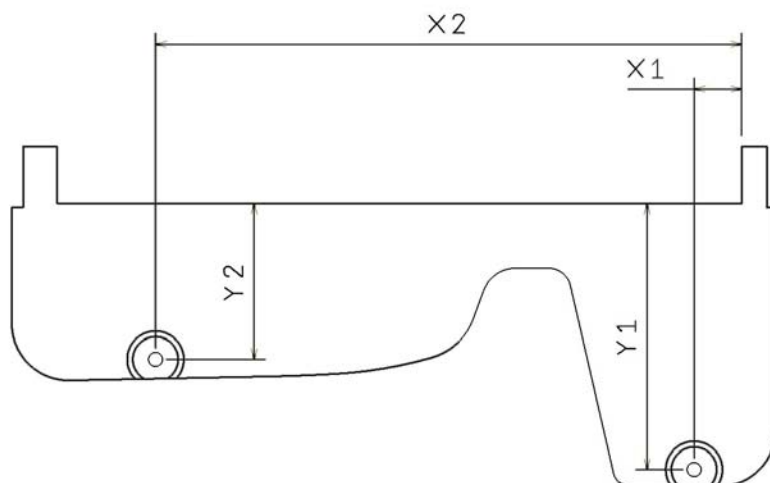
jedna ze ścianek rowka mocującego w korpusie zawarta jest w płaszczyźnie zawierającej oś narzędzia (rys. 6.1).

W celu jak najlepszego podparcia kaset kształt zewnętrznego zarysu korpusu narzędzia został wykonany jako odsunięcie uproszczonego zarysu profilu obrabianego koła (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Rysunek korpusu narzędzia frezarskiego.

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



Rys. 6.2. Kształt kasety mocującej z naniesionymi współrzędnymi przykładowo umiejscowionych gniazd płytek skrawających.

Zgrubnie zarys kaset został wykonany techniką wycinania laserowego, po czym zostały obrobione płaszczyzny ustalające, a grubość kaset została dopasowana do szerokości rowków korpusie narzędzia.

Po obrobieniu wszystkich powierzchni kaset następnie wykonano gniazda mocujące płytki skrawające w odpowiednich miejscach indywidualnie dla każdej pary ostrzy skrawających. Zestawienie współrzędnych środków gniazd ostrzy skrawających zawarto w tabeli 6.1. Wykonane kasety zostały zaprezentowane na rys. 6.3.

Tabela 6.1. Zestawienie współrzędnych środków gniazd skrawających dla każdej z kaset.

Lp.	X1	Y1	X2	Y2
1	-19,672	-46,797	-42,979	-8,989
2	-20,076	-44,848	-44,702	-9,855
3	-20,509	-42,965	-46,201	-11,068
4	-20,943	-41,082	-47,408	-12,572
5	-21,376	-39,199	-48,266	-14,299
6	-21,810	-37,316	-48,927	-16,115
7	-22,243	-35,433	-49,588	-17,930
8	-22,677	-33,550	-50,263	-19,740
9	-23,110	-31,667	-51,242	-21,401

Lp.	X1	Y1	X2	Y2
10	-23,543	-29,784	-52,590	-22,779
11	-23,977	-27,901	-54,228	-23,795
12	-24,410	-26,018	-56,055	-24,414
13	-24,844	-24,136	-57,924	-24,904
14	-25,277	-22,253	-59,805	-25,346
15	-25,711	-20,370	-61,697	-25,738
16	-26,144	-18,487	-63,598	-26,082
17	-26,577	-16,604	-65,507	-26,377
18	-27,011	-14,721	-67,424	-26,623
19	-27,518	-12,859	-69,346	-26,819
20	-28,462	-11,180	-71,273	-26,966
21	-29,828	-9,822	-73,202	-27,074
22	-75,131	-27,170	-100,243	-27,464
23	-77,062	-27,254	-102,174	-27,527
24	-78,993	-27,326	-104,104	-27,602
25	-80,924	-27,388	-106,035	-27,687
26	-82,855	-27,397	-107,964	-27,784
27	-84,787	-27,360	-109,893	-27,892
28	-86,719	-27,334	-111,822	-28,010
29	-31,512	-8,888	-88,651	-27,319
30	-33,387	-8,488	-90,583	-27,315
31	-35,319	-8,418	-92,515	-27,323
32	-37,251	-8,418	-94,447	-27,341
33	-39,182	-8,418	-96,379	-27,371
34	-41,111	-8,511	-98,311	-37,412



Rys. 6.3. Wykonane i uzbrojone w płytki skrawające kasety narzędzia frezarskiego

Po wykonaniu wszystkich elementów konstrukcji narzędzie zostało zmontowane w celu przeprowadzenia prób skrawaniowych. Narzędzie zostało zamocowane na trzpieniu podpartym w taki sposób, aby zapewnić dużą sztywność mocowania. Do badań przygotowano specjalną próbkę (rys. 6.4.) o profilu jezdnego koła tramwajowego o długości 150mm. Przygotowanie próbki o takim kształcie wynikało z konieczności zamocowania jej na siłomierzu sześcioskładowym Kistler 9257B w celu pomiaru sił skrawania podczas obróbki narzędziem frezarskim.



Rys. 6.4. Zdjęcia próbki profilu odwzorowującego zarys otoczki koła jezdnego przygotowana do pomiarów sił skrawania.

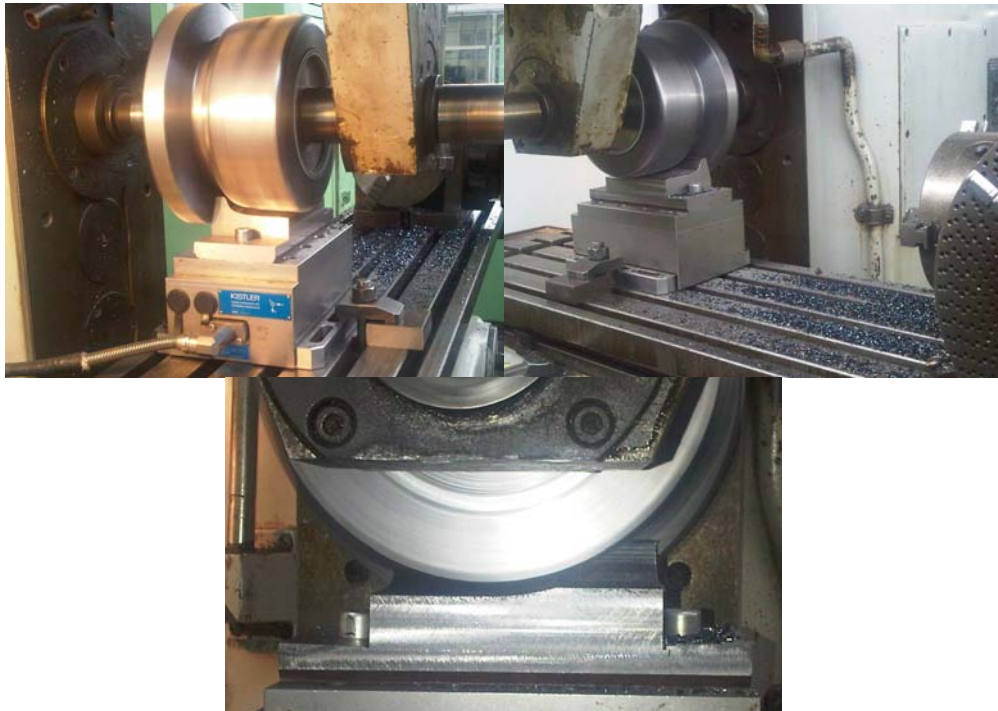
Po zmontowaniu stanowiska pomiarowego (siłomierz wraz z oprzyrządowaniem oraz próbką) nastąpiła seria pomiarów siły skrawania dla procesów realizowanych z różnymi parametrami obróbki (rys. 6.5.).

Prędkość skrawania oraz posuw zostały przyjęte na podstawie katalogu producenta płytek skrawających i wynosiły odpowiednio:

$$V_c = 120 \left[ \frac{m}{\text{min}} \right]$$

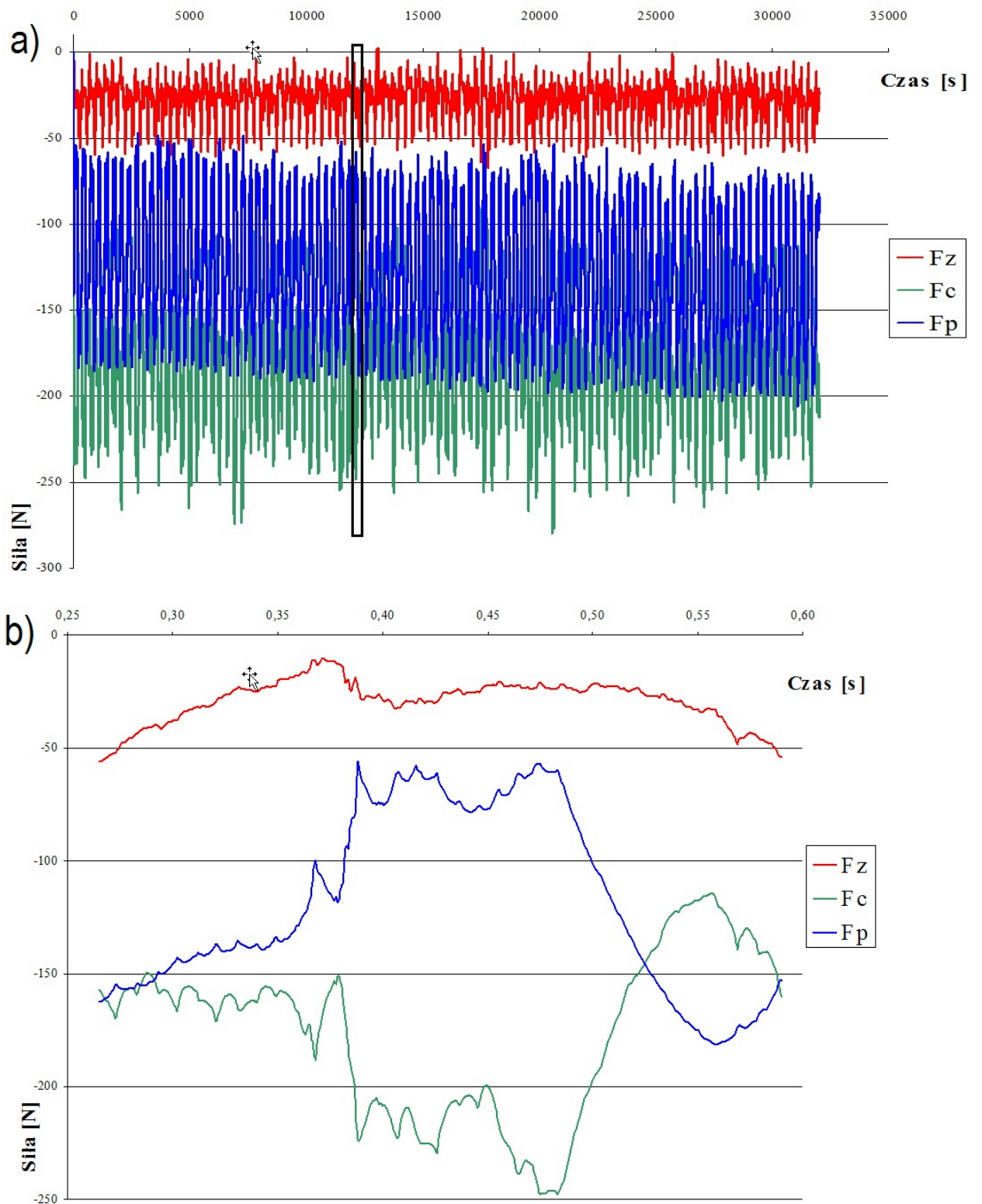
$$f_z = 0,1 \left[ \frac{mm}{\text{ostrze}} \right]$$

Głębokość frezowania była stopniowo zwiększana od 1 [mm] przez 2 [mm] i 4 [mm] do uzyskania docelowej głębokości tj. 5 [mm]. Przeprowadzono również pomiar siły skrawania przy zagłębianiu freza w kierunku normalnym do obrabianego profilu od wartości 0 do 5 [mm].

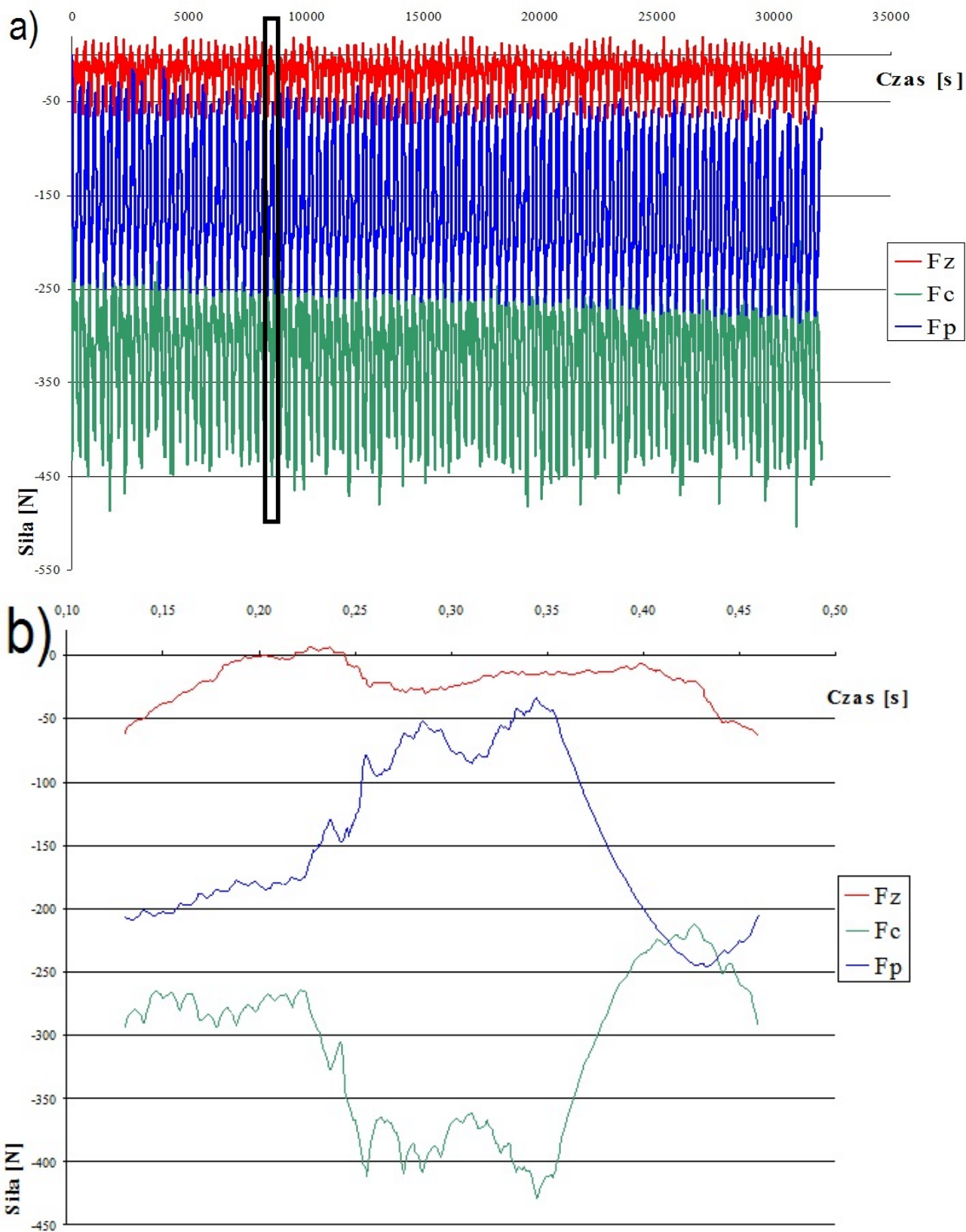


Rys. 6.5. Realizacja pomiaru sił skrawania.

Wynikiem przeprowadzonych badań były przebiegi wartości sił skrawania dla różnych grubości warstwy skrawanej. Wyniki przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 6.6.-6.8. Z każdego przebiegu na podstawie powtarzających się zmian wartości sił skrawania wyodrębniony został przebieg wartości sił dla jednego obrotu narzędzia.

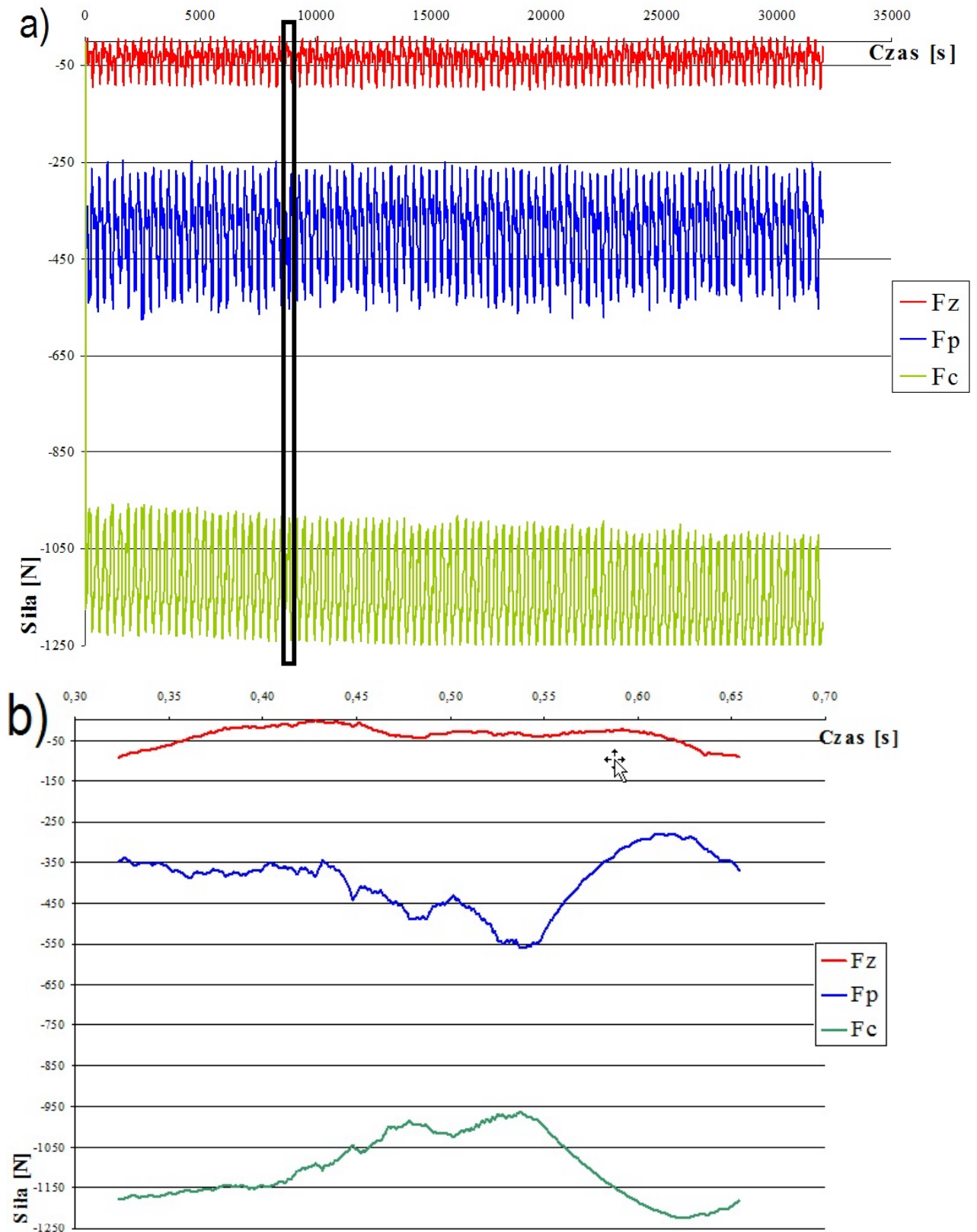


Rys. 6.6. Zarejestrowane przebiegi sił przy obróbce z głębokością 2mm: |  
 a) – zarejestrowany przebieg (czarnym prostokątem oznaczono wyodrębniony obrót narzędzia) b) – przebieg zmienności sił dla jednego obrotu narzędzia.



Rys. 6.7. Zarejestrowane przebiegi sił przy obróbce z głębokością 4mm: |  
 a) – zarejestrowany przebieg (czarnym prostokątem oznaczono wyodrębniony obrót narzędzia) b) – przebieg zmienności sił dla jednego obrotu narzędzia.

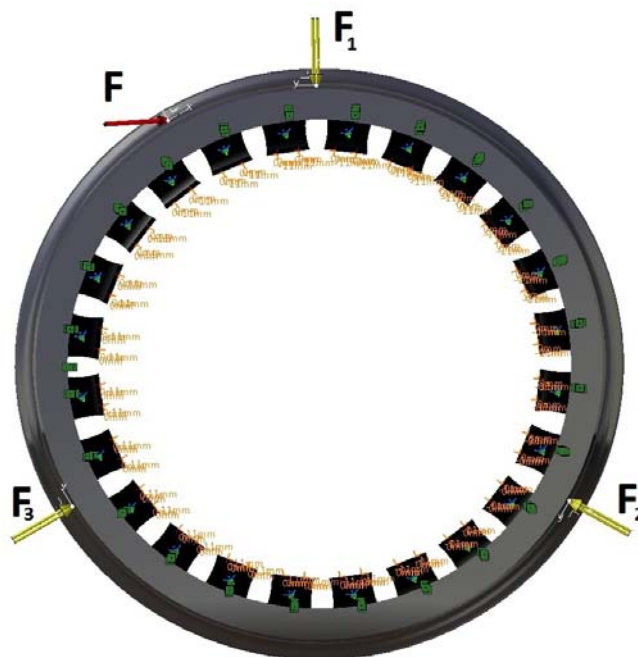




Rys. 6.8. Zarejestrowane przebiegi sił przy obróbce z głębokością 5mm: a) – zarejestrowany przebieg (czarnym prostokątem oznaczono wyodrębniony obrót narzędzia) b) – przebieg zmienności sił dla jednego obrotu narzędzia.

Na przedstawionych wykresach 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 największej głębokości skrawania osiąga wartość 110 [N]. Pozostałe składowe siły skrawania uzyskują wartości o rząd wielkości większy.

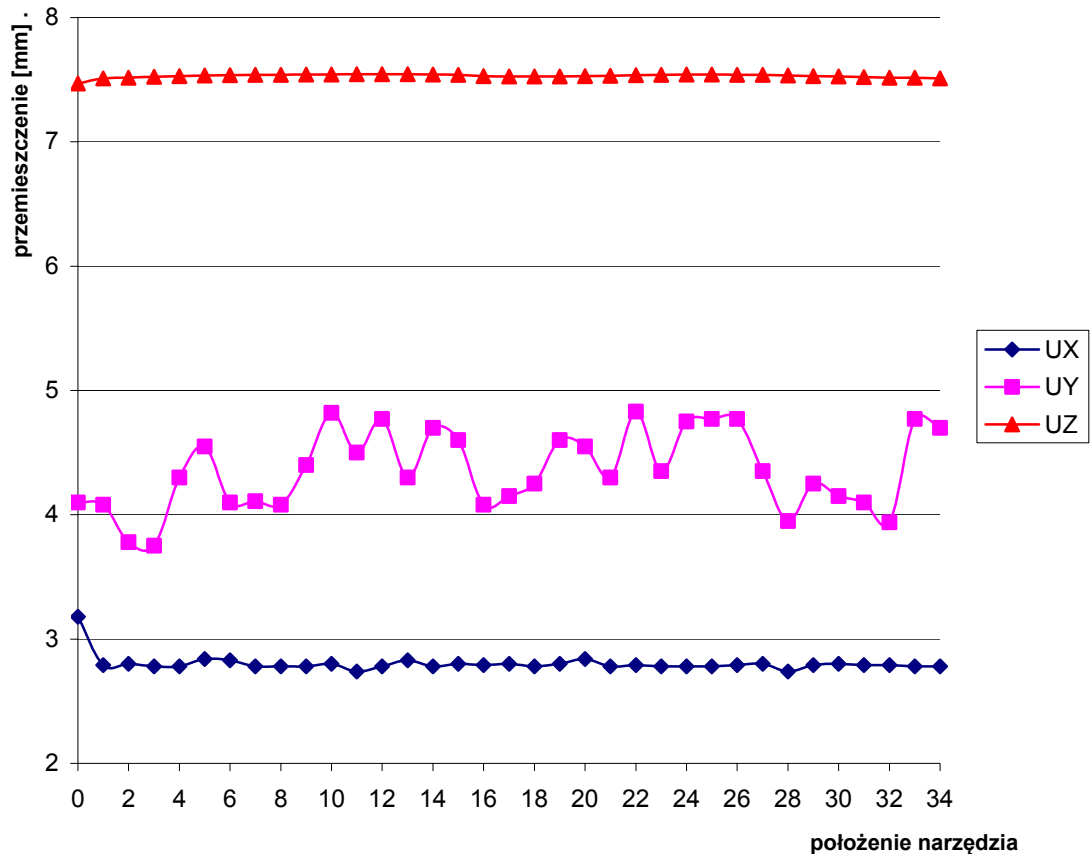
Zmierzone wartości siły skrawania wykorzystane zostały do analiz modelowych MES obrabianego koła tramwajowego w celu określenia przemieszczeń elementów układu OUPN. Dodatkowym elementem przeprowadzenia tych analiz było porównanie wyników obliczeń modelu obciążonego siłami otrzymanymi z pomiarów z wynikami obliczeń modelu opracowanego wcześniej (rozdział 5) dla układu sił wyznaczonego analitycznie.



Rys. 6.9. Model MES koła obrabianego, w którym:  $F$  – wypadkowa siła skrawania;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  – siły docisku rolek

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. 6.9.

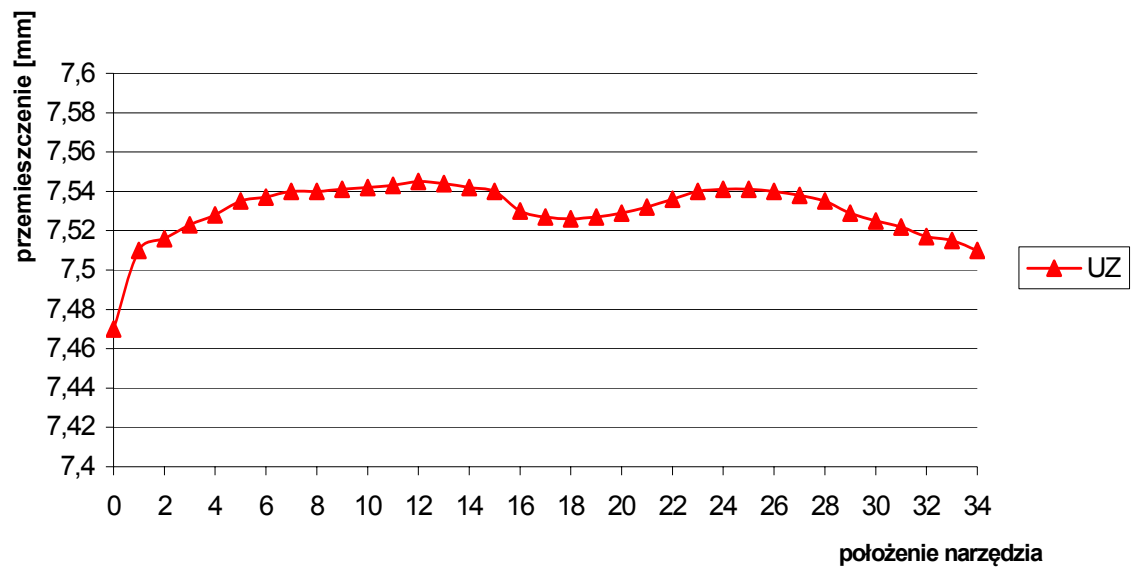


Rys 6.10. Określenie wartości przemieszczeń dla sił skrawania wyznaczonych empirycznie.

Na podstawie uzyskanych wyników analiz należy stwierdzić, że osiągnięto stabilne warunki pracy podczas obróbki prototypowym narzędziem. Największe nieregularności są widoczne w wartościach przemieszczeń w kierunku działania siły skrawania ( $F_c$ ). Należy tu jednak nadmienić, że siła ta jest równoważona przez siły tarcia powstające w wyniku docisku rolek napędzających, które mają stałe wartości.

Aby szczegółowo przeanalizować przebieg przemieszczenia węzła obciążonego siłą skrawania w najbardziej interesującym, z punktu widzenia

prorowadzonych badań, kierunku wzdłuż osi zestawu przedstawiono ten przebieg na odrębnym wykresie na rys. 6.11.



Rys 6.11. Wyznaczone przemieszczenia w kierunku osi Z – wzdłuż osi zestawu kołowego.

W położeniu 0 obliczenia dokonano dla modelu obciążonego jedynie siłami wynikającymi z docisku rolek napędzających. Dla pozostałych punktów pracy narzędzia wartości przemieszczenia nie wykazują gwałtownych zmian, a ich wartości są niewielkie w porównaniu do przemieszczeń wywołanych siłami wynikającymi ze sposobu napędzania przedmiotu obrabianego. Należałoby zatem rozważyć możliwość zmniejszenia wartości tych sił podczas pracy zaproponowanym narzędziem. W omawianych obrabiarkach TUU 1250 produkowanych przez firmę PPW Koltech docisk i napęd rolek są realizowane przez układ hydrauliczny, co sprawia że regulacja lub zmiana układu sił nie powinna nastręczać trudności i nie wymaga zmian konstrukcyjnych obrabiarki. Ponadto ten sposób realizacji napędu daje szerokie pole do regulacji prędkości obrotowej obrabianego zestawu, a dla proponowanego narzędzia wymagane jest znaczne obniżenie tego parametru.

W związku z tym przeprowadzona została symulacja obciążenia modelu koła przy odpowiednio zmniejszonym nacisku rolek napędzających. W celu napędzenia obrabianego koła podczas pracy tarcie rolek napędzających musi równoważyć składową  $F_c$  siły skrawania, której wartość wynosi:

$$F_c = 1200 \text{ [N]} = T$$

Przyjmując współczynnik tarcia stali o stal na poziomie:

$$\mu = 0,15$$

Sumaryczny nacisk wszystkich trzech rolek napędowych powinien osiągać wartość:

$$F_\Sigma = \frac{T}{\mu} = \frac{1200}{0,15} = 8000 \text{ [N]}$$

Wprowadzając współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 1,5 otrzymano wartość wymaganego nacisku sumarycznego rolek napędzających na poziomie:

$$F_\Sigma = 8000 * 1,5 = 12000 \text{ [N]}$$

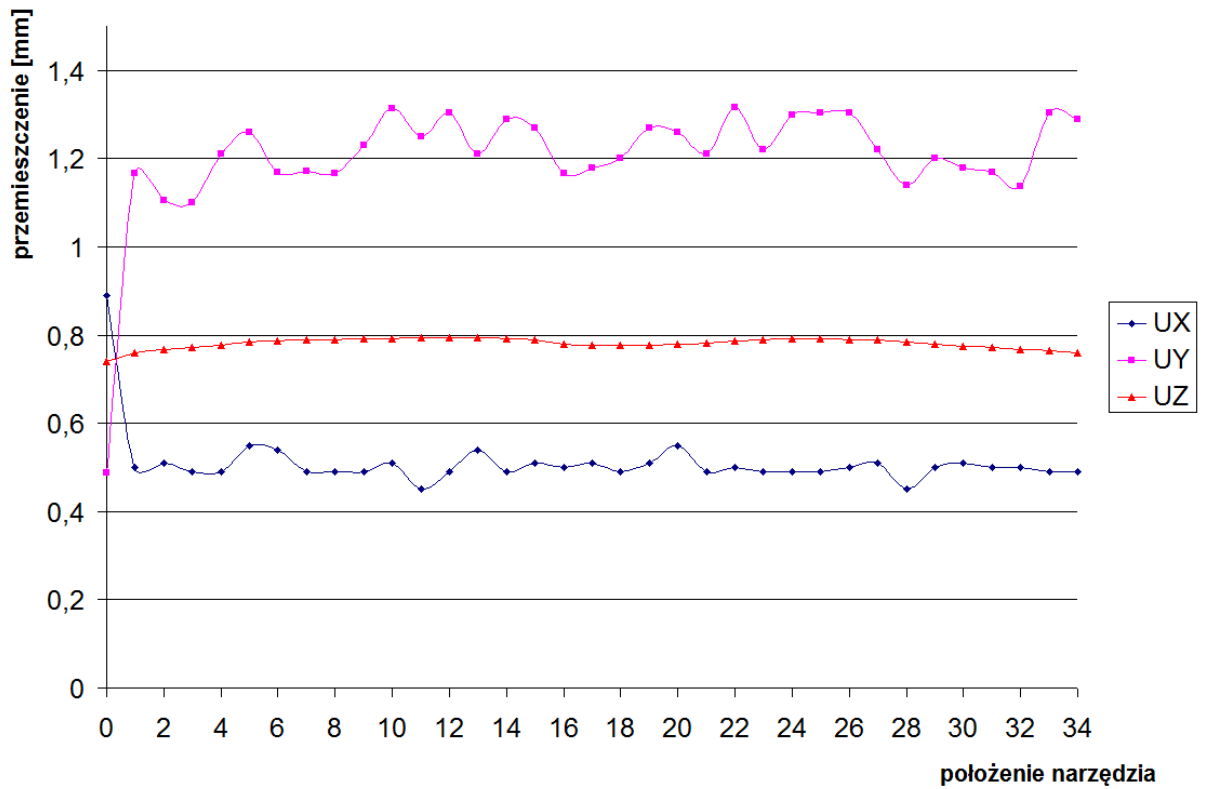
Zakładając podobny rozkład sił docisku poszczególnych rolek taki jak to ma miejsce w istniejącym rozwiązaniu przyjęto następujące siły nacisku rolek:

$$F_1 = 6500 \text{ [N]}$$

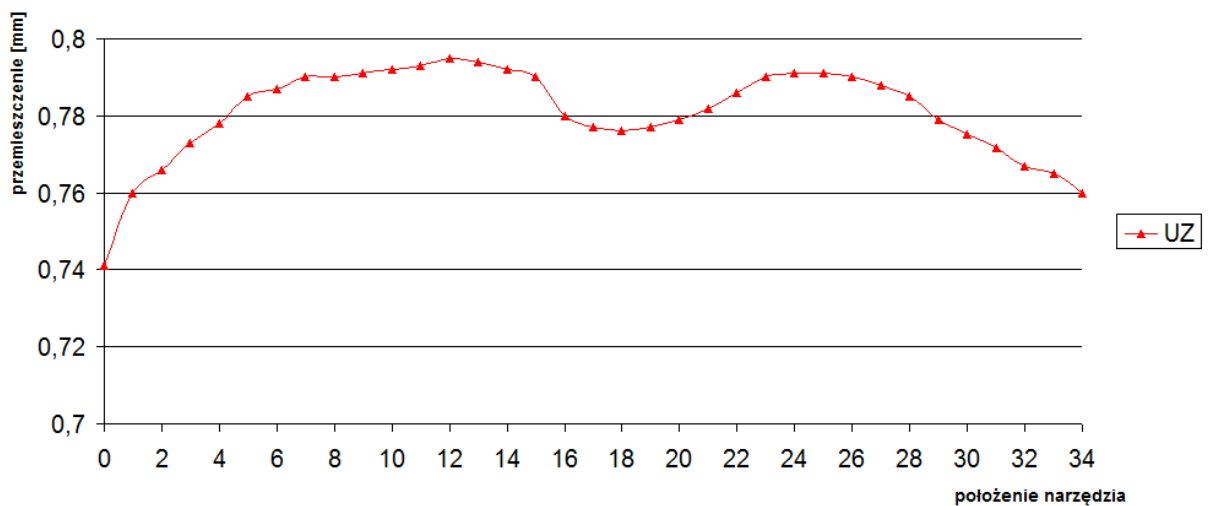
$$F_2 = F_3 = 2750 \text{ [N]}$$

gdzie  $F_1$ - siła docisku górnej rolki,  $F_2, F_3$  - siły docisku dolnych rolek.

Dla takich wartości sił docisku oraz odpowiednio zmniejszonych sił tarcia przeprowadzono obliczenia modelu MES (rys.6.9). Wyniki obliczeń przemieszczenia w punkcie skrawania pokazano w formie wykresów na rys. 6.12. i 6.13.



Rys 6.12. Wyznaczone wartości przemieszczeń dla przyjętych na podstawie badań wartości sił skrawania oraz obniżonych sił docisku rolek napędzających.



Rys 6.13. Wyznaczone przemieszczenia w kierunku osi Z – wzdłuż osi zestawu kołowego.

W tym przypadku w punkcie oznaczonym 0 pokazano wyniki obliczeń (wartość przemieszczenia) modelu obciążonego samymi siłami docisku rolek.

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].

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

## 7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

- Zastosowana metodyka badań analitycznych i doświadczalnych wykazała, że technologia regeneracji profilu jezdnych zestawów kołowych z wkładkami elastycznymi jest zagadnieniem bardzo złożonym, a wdrożenie jej do praktyki przemysłowej jest możliwe pod warunkiem zastosowania specjalnego oprzyrządowania montowanego na tokarkach kołowych z napędem ciernym.
- Opracowany model obliczeniowy MES zestawu kołowego okazał się narzędziem bardzo skutecznym, umożliwiającym przeprowadzenie relatywnie szybko dużej liczby analiz sztywnościowo-wytrzymałościowych dla bardzo wielu wariantów rozwiązania. Została dokonana walidacja tego modelu wynikami badań doświadczalnych.
- Najtrudniejszym zagadnieniem do rozwiązania okazało się prowadzenie obróbki skrawaniem przedmiotu obrabianego o wyjątkowo dużej podatność, szczególnie w kierunku równoległym do osi zestawu kołowego. Stosując wydajność toczenia zbliżoną do wydajności z jaką obrabiane są zestawy kolejowe, różnica przemieszczeń obrabianej obręczy w strefie skrawania w kierunku poposiowym między wartością maksymalną ( $U_z = 7,81$  [mm]) i minimalną ( $U_z = -4,45$  [mm]) osiągnęła wartość 12,26 [mm], która dyskwalifikuje tę technikę obróbki. Podane



wartości przemieszczeń zostały wyznaczone analitycznie i potwierdzone badaniami doświadczalnymi w procesie skrawania.

- Rozwiązanie w postaci zastosowania podparcia przedmiotu obrabianego podczas skrawania w kierunku największej podatności, również nie spełniało zakładanych wymagań. Faktycznie, efekty zastosowania podtrzymki były znaczące, jednakże nie wystarczające nawet przy obniżonych parametrach obróbki. Przy znacznie obniżonych parametrach obróbki uzyskano efekty w postaci relatywnie małych wartości przemieszczeń obrabianej obręczy, jednak wyniki te nie są zadowalające. Ponadto, zastosowanie podtrzymki podczas obróbki zestawów kołowych powoduje dodatkowe trudności w obsłudze obrabiarki.
- Wnioski wypływające z analiz obliczeniowych i badań doświadczalnych opracowanych podczas realizacji pracy wariantów rozwiązania skłoniły do radykalnej zmiany podejścia myślowego do tego problemu. Ostatecznie opracowano koncepcję narzędzia obrotowego, w którym ze względu na odmienny do toczenia charakter pracy następuje zmiana układu sił skrawania. Zaproponowano również opracowanie koncepcji równoważenia sił poosiowych podczas takiej obróbki. Rozwiązanie takie wymaga wprowadzenia zastosowania dodatkowego wrzeciona napędzającego narzędzie obrotowe, jednakże nie stanowi to poważnego problemu, ponieważ nowoczesne elektrowrzeciona charakteryzują się niewielkimi rozmiarami gabarytowymi oraz niewysokimi kosztami zakupu i eksploatacji. W efekcie wielu prób, analiz i doświadczeń zaprojektowano frez specjalny do regeneracji profilu jezdnego.

- Wykonano prototyp narzędzia oraz przeprowadzono próby pracą. Badania analityczne oraz próby te wykazały trafność podjętych decyzji projektowych oraz w pełni potwierdziły osiągnięcie celu głównego, jakim było opracowanie technologii obróbki profilu jezdnego tramwajowego zestawu kołowego z wkładkami elastycznymi. Należy podkreślić, że zachowano przy tym wydajność procesu, która jest porównywalna z wydajnością obróbki kolejowych zestawów kołowych.

Uzyskano poprawę następujących parametrów procesu:

- Zdecydowane obniżono wartość składowej poosiowej siły skrawania z 15 [kN] zmierzonej podczas standardowej obróbki do wartości 110 [N] przy obróbce frezem specjalnym.
- Zmniejszono wartości sił docisku rolek napędzających z wartości  $F_1 = 60$  [kN],  $F_2 = F_3 = 25$  [kN] do wartości  $F_1 = 6,5$  [kN],  $F_2 = F_3 = 2,75$  [kN]. Spowodowało to znaczne zmniejszenie wartości przemieszczeń obręczy zestawu kołowego wynikających ze sposobu napędzania zestawu kołowego. Zarówno przy toczeniu jak i w procesie frezowania sposób przekazywania napędu generuje duże wartości przemieszczeń obrabianej obręczy.
- Radykalnie zmniejszono różnicę przemieszczeń (między wartością maksymalną i minimalną) występującą w strefie skrawania w kierunku poosiowym z wartość 12,26 [mm] zaobserwowanych w pierwszych próbach toczenia do wartości 0,05 [mm] w przypadku frezowania narzędziem specjalnym.

- Zastosowanie narzędzia frezarskiego zmieniło postać wióra ze wstęgowego, typowego dla operacji tokarskich na wiór krótki typowy dla operacji frezarskich, co korzystnie wpływa na sposób jego usuwania ze strefy skrawania oraz ułatwia wprowadzenie elementów automatyzacji procesu.

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 1., Mechanik 2004, Nr 10.
2. Cichosz P.: Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego. Część 2., Mechanik 2004, Nr 11.
3. Cichosz P.: Kierunki zwiększania efektywności toczenia, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, PAN, 17, 1993, 4.
4. Cichosz P.: Narzędzia skrawające, WNT, Warszawa, 2006.
5. Cichosz P.: Przykłady ekonomicznej analizy doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego, Mechanik 2004, Nr 11.
6. Cichosz P., Darlewski J., Oczóś K.: Nowoczesne trendy rozwojowe w obróbce skrawaniem, Wrocławskie Sympozjum – Automatyzacja produkcji 2000 Wiedza –Technika –Postęp, Prace naukowe ITMiA Politechniki Wrocławskiej, nr 78, Seria Konferencje, nr 36, Wrocław 2000.
7. Cichosz P., Kuzinowski M.:Narzędzia skrawające do wysokowydajnej obróbki, Inżynieria Maszyn Rok 14, Zeszyt 4, Wysokowydajne skrawanie, pod red. Wita Grzesika, Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, Wrocław 2009.
8. Cichosz P., Kuzinowski M.: Narzędzia Mechatroniczne w skrawaniu, Obróbka skrawaniem, Zaawansowana technika, Szkoła obróbki

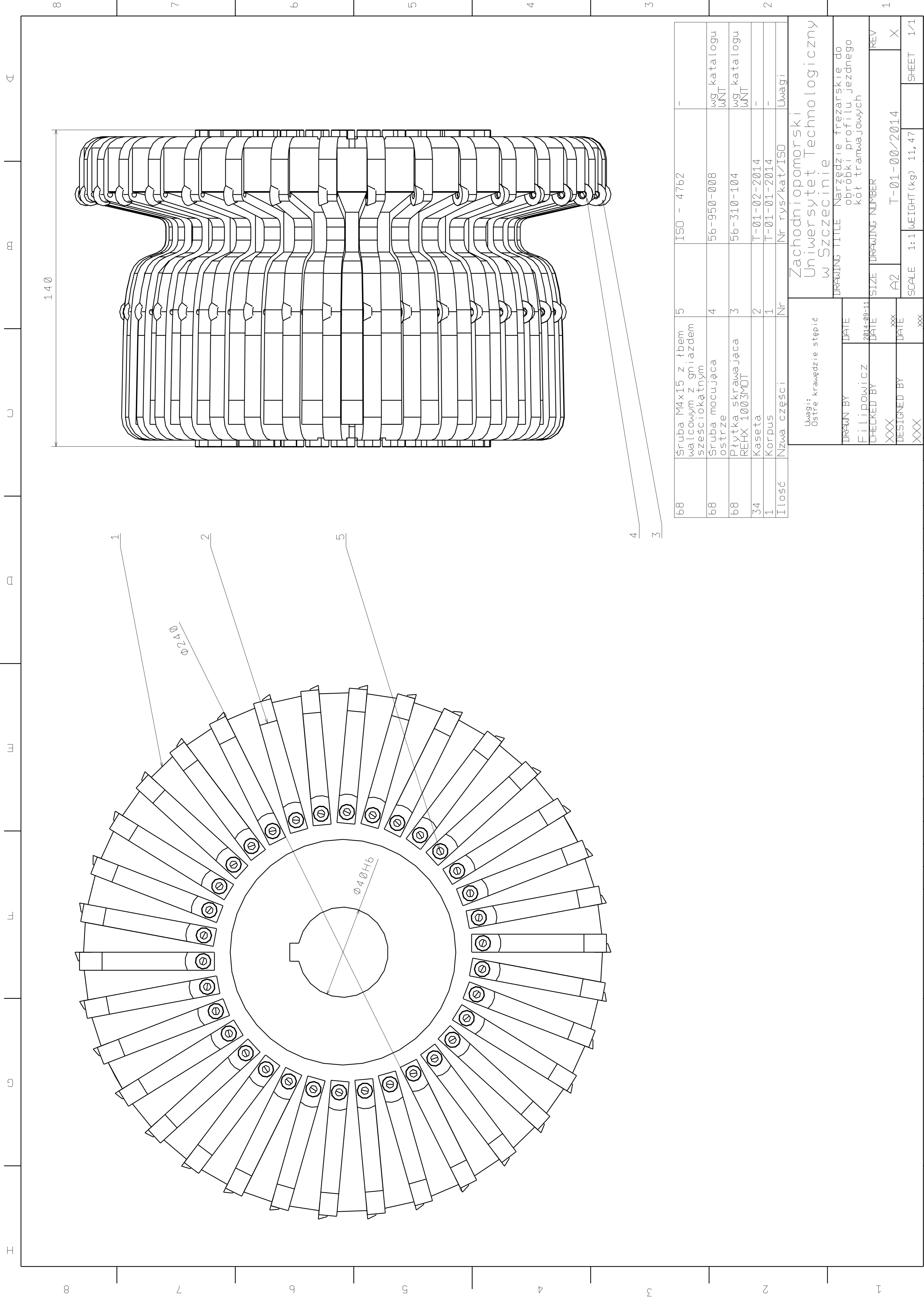
- skrawaniem pod red. Huberta Latosia, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.
9. Dmochowski J.: Podstawy obróbki skrawaniem, WNT, Warszawa, 1983.
  10. Dmochowski J., Majewski W., Zieliński Z.: Technologia narzędzi skrawających, WNT, Warszawa, 1977.
  11. Filipowicz K. Basic data for construction of cutting tool generating required cutting force model, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Nr 2, 2013.
  12. 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.
  13. Filipowicz K., Biedunkiewicz W., Grzesiak D., Królikowski M.: Machining of Resilient wheelsets on wheel-turning lathes, *Daaam international scientific book 2010*, Daaam International Vienna, Wiedeń, 2010.
  14. Górski E., Harasymowicz J.: Podstawy projektowania narzędzi skrawających z zagadnieniami technologicznymi, WNT, Warszawa, 1989.
  15. Górski E.: Frezy, WNT, Warszawa, 1977.
  16. Górski E.: Poradnik frezera, WNT, Warszawa, 2000.
  17. Grzesik W.: *Advances machining process of metallic materials*, Elsevier, Amsterdam, 2008.
  18. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych, WNT Warszawa, 1998

19. Grzesik W., Niestony P., Bartoszek M.: Modeling of the cutting process analytical and simulation methods, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Nr 1, 2009.
20. Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1998.
21. Kaczmarek J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej*, WNT, Warszawa, 1971
22. Kawalec M.: *Efekty technologiczne obróbki na twardo materiałów metalowych*, *Mechanik*
23. Kunsterrer S.: *Podstawy konstrukcji narzędzi skrawających*, WNT, Warszawa, 1980.
24. Kupczyk M., Siwak P.: *Klasyfikacja i kierunki rozwoju materiałów powłokowych na ostrza skrawające*, *Obróbka skrawaniem, Zaawansowana technika, Szkoła obróbki skrawaniem* pod red. Huberta Latosia, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2009.
25. Oczóś K.: *Wysoko wydajne frezowanie – Określanie siły skrawania i mocy silnika napędowego*, *Mechanik* 1997, Nr 2.
26. Oczóś K.: *Postęp w obróbce skrawaniem. Obróbka z dużymi prędkościami*, *Mechanik* 1998, Nr 3.
27. Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*, WNT, Warszawa 2008.
28. Romaniszyn Z.: *Podwozia wózkowe pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Instytutu Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
29. Sałaciński T.: *Postępy w konstrukcji narzędzi skrawających*, *Czasopismo internetowe [www.e-obrobkametalu.pl](http://www.e-obrobkametalu.pl) nr2/2012.*

30. Stós J., Czechowski K., Wszolek J.: Narzędzia specjalne do obróbki materiałów trudnoobrabialnych, *Mechanik*, 2004, Nr 5-6.
31. Stryczek R.: Optymalizacja kształtu regenerowanych obręczy kół tramwajowych, *Przegląd Mechaniczny*, 2007, Nr 12
32. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z.: *The finite element method: its basis and fundamentals*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
33. Praca zbiorowa: *Pracownik inżyniera- Obróbka skrawaniem Tom II*, WNT, Warszawa, 2000.
34. PN-EN 13715:2006 Tabor kolejowy - Zarys zewnętrzny obręczy i wieńców kół bezobrzęczowych zestawów kołowych.
35. PN-K-91045:2002 Tabor kolejowy - Zestawy kołowe - Wymagania i metody badań
36. Heinemann A., Patent USA Nr 5678963
37. Heinemann A., Patent USA Nr 5678966
38. Naumann H. J., Hermann R., Robotta R., Lutze H., Patent USA Nr 5890854
39. Naumann H. J., Robotta R., Schrota G., Gerhard W., Patent USA Nr 5927167
40. Materiały katalogowe firmy DOLFAMEX
41. Materiały katalogowe firmy ISCAR
42. Materiały katalogowe firmy MITSUBISHI
43. Materiały katalogowe firmy SANDVIK
44. Materiały katalogowe firmy WNT.

## Załączniki

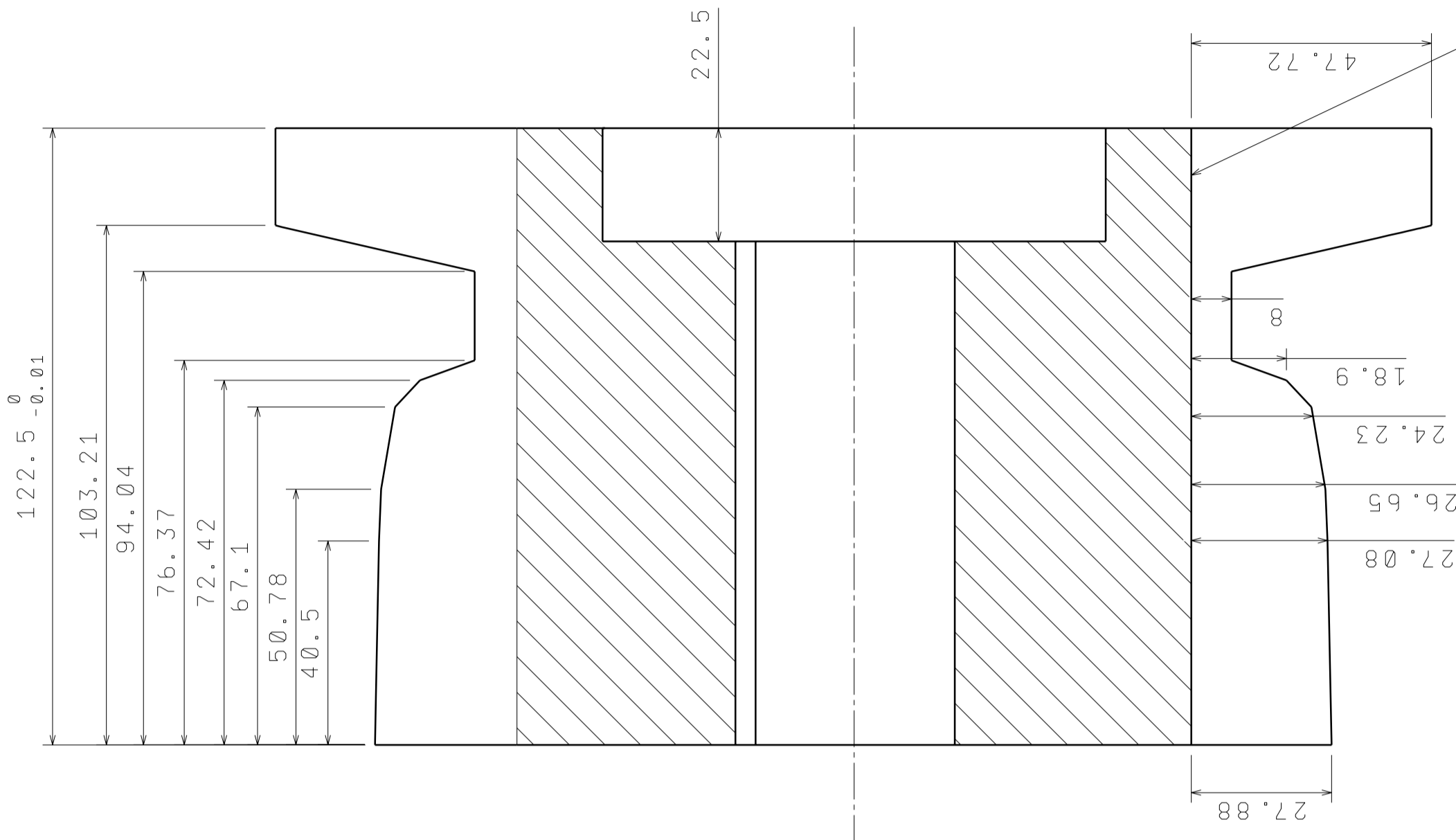
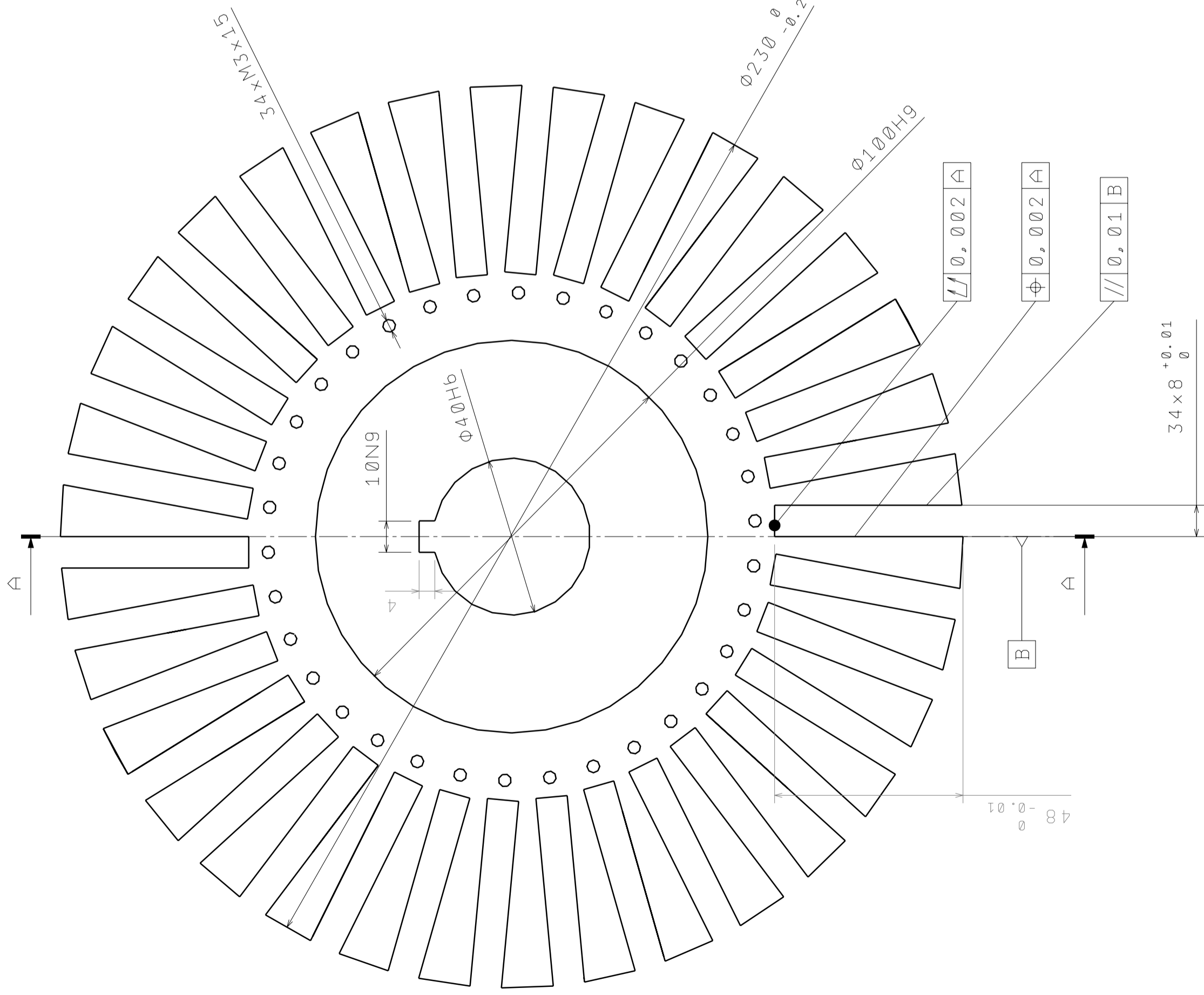




68	Struba M4x15 z łbem walcowym z gniazdem sześciokątnym	5	ISO - 4762	-
68	Struba mocująca ostrze	4	56-950-008	wg katalogu WNT
68	Płytki skrawająca REHX 1003MOT	3	56-310-104	wg katalogu WNT
34	Kaseta	2	T-01-02-2014	-
1	Korpus	1	T-01-01-2014	-
Ilość	Nzwa części	Nr	Nr rys/kat/ISO	Uwagi

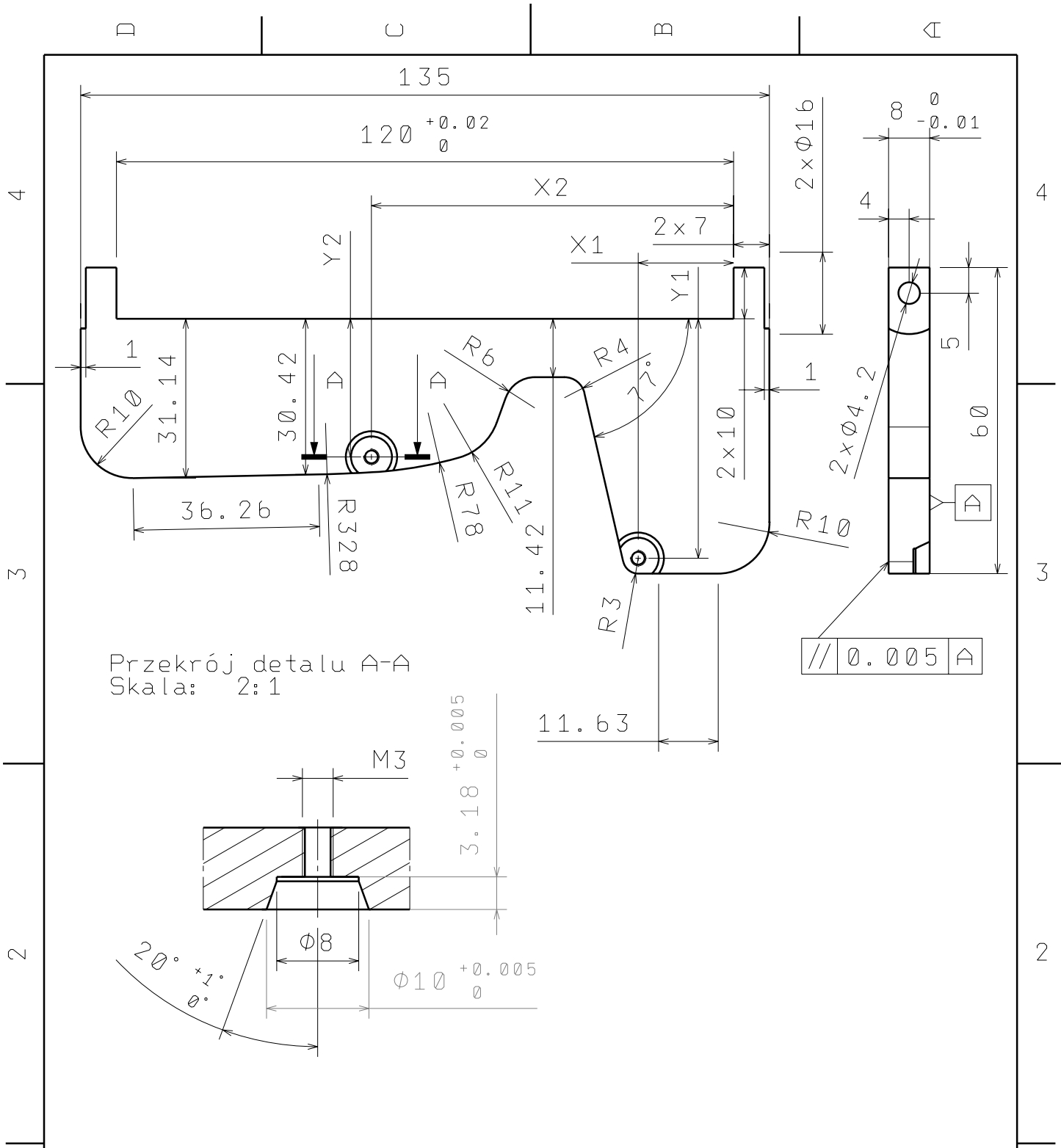
Uwagi: Ostre krawędzie stepić		Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie	
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE	Narzędzie frezarskie do obróbki profilu jezdnego kół tramwajowych
FILIPOWICZ	2014-09-11	SIZE	A2
CHECKED BY	DATE	DRAWING NUMBER	T-01-00/2014
XXX	XXX	REV	X
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1
XXX	XXX	WEIGHT (kg)	11,47
		SHEET	1/1

Wymiary	Odchyłka
10N9	+0,000
	-0,036
40H6	+0,016
	-0,000



Przekrój A-A  
Skala 1:1

Uwagi: Nietolerowane wymiary traktować jako $\pm 0,05$ Ostre krawędzie stepić		Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie	
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE	
FIJLIDOWICZ	2014-09-11	Korpus	
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
XXX	XXX	A2	T-01-01/2004
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1 WEIGHT (kg)
XXX	XXX	17,5	SHEET 1/1



Przekrój detalu A-A  
Skala: 2:1

Uwagi:  
Wymiary X1 X2 Y1 Y2  
wg załączonej tabeli  
Ostre krawędzie stepić  
Nietolerowane wymiary  
traktować jak +/- 0,05

Zachodniopomorski  
Uniwersytet Technologiczny  
w Szczecinie

DRAWING TITLE

DRAWN BY	DATE
Filipowicz	2014-09-11

CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER	REV
XXX	xxx	A4	T-01-02/2014	

DESIGNED BY	DATE	SCALE	WEIGHT (kg)	SHEET
XXX	xxx	1:1	0,27	1/1

**Tabela wartości współrzędnych środków gniazd skrawających do rysunku T-01-02/2014.**

lp.	X1	Y1	X2	Y2
1	-19,672	-46,797	-42,979	-8,989
2	-20,076	-44,848	-44,702	-9,855
3	-20,509	-42,965	-46,201	-11,068
4	-20,943	-41,082	-47,408	-12,572
5	-21,376	-39,199	-48,266	-14,299
6	-21,810	-37,316	-48,927	-16,115
7	-22,243	-35,433	-49,588	-17,930
8	-22,677	-33,550	-50,263	-19,740
9	-23,110	-31,667	-51,242	-21,401
10	-23,543	-29,784	-52,590	-22,779
11	-23,977	-27,901	-54,228	-23,795
12	-24,410	-26,018	-56,055	-24,414
13	-24,844	-24,136	-57,924	-24,904
14	-25,277	-22,253	-59,805	-25,346
15	-25,711	-20,370	-61,697	-25,738
16	-26,144	-18,487	-63,598	-26,082
17	-26,577	-16,604	-65,507	-26,377
18	-27,011	-14,721	-67,424	-26,623
19	-27,518	-12,859	-69,346	-26,819
20	-28,462	-11,180	-71,273	-26,966
21	-29,828	-9,822	-73,202	-27,074
22	-75,131	-27,170	-100,243	-27,464
23	-77,062	-27,254	-102,174	-27,527
24	-78,993	-27,326	-104,104	-27,602
25	-80,924	-27,388	-106,035	-27,687
26	-82,855	-27,397	-107,964	-27,784
27	-84,787	-27,360	-109,893	-27,892
28	-86,719	-27,334	-111,822	-28,010
29	-31,512	-8,888	-88,651	-27,319
30	-33,387	-8,488	-90,583	-27,315
31	-35,319	-8,418	-92,515	-27,323
32	-37,251	-8,418	-94,447	-27,341
33	-39,182	-8,418	-96,379	-27,371
34	-41,111	-8,511	-98,311	-37,412