

dr hab. inż. Piotr Skawiński, prof. PW
Zakład Techniki Wytwarzania
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84
02-524 Warszawa
tel: 22- 849-03-01
e-mail: *psk@simr.pw.edu.pl*

Warszawa, 5.03.2016

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr inż. Piotra Strojnego

Geometria uzębienia typu Beveloid w przekładniach
z tworzyw polimerowych

Podstawa opracowania

Pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa, z dnia 15 grudnia 2015r. o numerze RM-530-26-03-2015 na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 9 grudnia 2015 roku.

1. Temat rozprawy doktorskiej

Koła stożkowe typu Beveloid znane są w technice od parudziesięciu lat (patent firmy Vinco Corporation), zaś rosnący w ostatnich latach obszar ich zastosowań skłonił wiele ośrodków naukowych do podjęcia dalszych prac badawczych. Koła typu Beveloid wykorzystywane są w szeroko rozumianym przemyśle maszynowym włączając w to przemysł motoryzacyjny po przemysł elektromaszynowy, w szczególności w sektorze AGD. W tym ostatnim przede wszystkim wykonywanych z tworzyw polimerowych. Literatura krajowa jak i światowa odnotowuje pojedyncze publikacje opisujące geometrię i wytrzymałość polimerowych kół typu Beveloid. Temat rozprawy doktorskiej dotyczy kół zębatach typu Beveloid wykonywanych z tworzyw polimerowych, a zatem koncentruje się na kołach zębatach pracujących w mechanizmach wyrobów AGD, a więc o małych mocach. Bardzo ważną cechą kół typu Beveloid wykonywanych z tworzyw polimerowych jest ich łatwość usuwania z form wtryskowych. Ta cecha, ale nie jedyna, decyduje, że konstruktorzy chętnie sięgają po tego typu koła w projektowanych mechanizmach urządzeń sektora AGD przemysłu elektromaszynowego. Prawidłowa współpraca kół zębatach to równomierne przenoszenie momentu obrotowego, cichobieżność i trwałość, w tym także w aspekcie trybologicznym. Tak jak w każdym przypadku analiz i badań kół zębatach w pracy zajęto się metodami modelowania kół typu Beveloid o prostej i śrubowej linii zęba, ich analizą współpracy i badaniami stanowiskowymi, przede wszystkim mając na uwadze inny, nie metalowy materiał konstrukcyjny. Podejmując decyzje konstrukcyjne i technologiczne na etapie projektowania kół zębatach w tym kół Beveloid, w szczególności z tworzyw polimerowych, projektant wykorzystuje swoją wiedzę i doświadczenie, ale także sięga do dostępnych publikowanych w literaturze wyników badań. Ten aspekt pracy projektanta wynika z ciągłego rozwoju nauki i techniki i przekładania jej na co raz to doskonalszą postać produktu.

Przedstawione w rozprawie doktorskiej zagadnienia dotyczą tematyki modelowania kół Beveloid z wykorzystaniem sparametryzowanych modeli narzędzia i otoczki metodą symulacji obróbki w środowisku programu CAD, a także porównania jej z drugą metodą opartą o opis matematyczny. Porównanie przez Autora zaproponowanych metod daje projektantowi pogląd na zalety i wady wybranego sposobu modelowania koła Beveloid. O ile w modelowaniu na podstawie formuł matematycznych można utworzyć model parametryczny i szybko modyfikować budowaną geometrię koła Beveloid, to w przypadku modelu symulacyjnego wymaga to przy każdej zmianie parametru generowania nowej bryły koła od podstaw, jednakże ten sposób modelowania odzwierciedla proces obróbki. Ten ostatni sposób stał się możliwy dzięki wewnętrznym językom systemów CAD, szablonom czy też możliwościom aplikacyjnym języków programowania obiektowego. Takie ujęcie różni korzystnie tematykę rozprawy od wielu publikacji z zakresu kół Beveloid i daje projektantowi możliwość wyboru budowy modelu powierzchniowego czy bryłowego koła Beveloid. Zbudowane modele posłużyły do analiz śladu współpracy jak i badań wytrzymałościowych, a przede wszystkim do badania wpływu „kąta zwięzienia” na wartość naprężeń w stopie zęba i naprężeń stykowych na bocznych powierzchniach zęba. Do badań tych koniecznym jest wykorzystanie środowiska CAE - metody elementów skończonych. Podjęta w pracy problematyka kół Beveloid wynika moim zdaniem z zapotrzebowania przemysłu elektromaszynowego sektora AGD.

Prawidłowe zdefiniowanie geometrii uzębienia kół Beveloid, zweryfikowanie śladu współpracy, ocena naprężeń kontaktowych, naprężeń w stopie zęba i dla konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego i technologicznego określa poprawność współpracy przekładni. Cele te można osiągnąć angażując systemy CAD i CAE (FEM) co w dobie dynamicznego rozwoju systemów komputerowego wspomaganie prac inżynierskich jest niezbędnym elementem przygotowania technicznego produkcji. Wykorzystując te systemy można znacznie skrócić czas technicznego przygotowania produkcji, zmniejszyć koszty z tym związane i obniżyć cenę produktu. Może to skutkować zwiększeniem liczby potencjalnych odbiorców i poszerzeniem rynku zbytu. Wdrożenie do produkcji nowych kół, a taki jest cel wcześniej podjętych wszystkich działań, wiąże się z badaniami stanowiskowymi, a zatem z koniecznością posiadania specjalistycznej aparatury badawczej i prowadzenia testów. Wiąże się to z koniecznością poniesienia znacznych wydatków. Z tego powodu uzasadnione jest poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań dotyczących modelowania i analizy ząbienia, umożliwiające przeprowadzenie niezbędnych badań wstępnych w środowisku wirtualnym minimalizując tym samym ilość prób wykonywanych w warunkach rzeczywistych. Wymusza to konieczność prowadzenia badań dotyczących możliwości zastosowania systemów wspomaganie projektowania do modelowania, analizy ząbienia i wytrzymałości w środowisku systemów CAD i CAE.

Możliwość generowania modeli bryłowych metodami symulacyjnymi albo z wykorzystaniem modeli matematycznych oraz przeprowadzenia analizy ząbienia z wykorzystaniem uniwersalnego narzędzia jakimi są systemy CAD, zapewni wymierne efekty w postaci umożliwienia weryfikacji poprawności zaprojektowanych kół zębatych Beveloid. Takie rozwiązanie jest znaczącym ułatwieniem dla sektora MiŚ przedsiębiorstw dysponujących ograniczonymi środkami finansowymi. Z tych względów opracowania metod i procedur modelowania, weryfikacji wytrzymałościowej i analizy ząbienia przekładni Beveloid (w tym śladu współpracy) może przynieść wymierne pozytywne skutki ekonomiczne dla sektora MiŚ przedsiębiorstw.

Uwzględniając aktualne potrzeby przemysłu elektromaszynowego sektora AGD podjęta tematyka rozprawy doktorskiej wpisuje się w bieżącą tendencję rozwoju współpracy nauki z przemysłem, zaś celami operacyjnymi Regionalnej Strategii Innowacji jest wspieranie powstawania nowych specjalizacji sektora B+R, jak również dostosowanie do potrzeb

przedsiębiorstw oferty szkoleniowo-doradczej w zakresie innowacji oraz rozwój innowacyjnych usług. Z tego względu celowe jest prowadzenie przez Doktoranta dalszych prac badawczych nad opracowaniem spójnego systemu projektowania kół Beveloid opartego na dostępnych systemach CAD i CAE.

Tym zagadnieniom poświęcona jest recenzowana praca. Uwzględniając powyższy opis, jej tematyka, cele i zakres są wybrane bardzo trafnie.

Temat rozprawy jest więc zatem wybrany właściwie, a rozważone w niej zagadnienia dotyczące modelowania, wytrzymałości i analizy zażębenia kół typu Beveloid mają istotne znaczenie teoretyczne i praktyczne.

2. Omówienie rozprawy

Praca została podzielona na 6 rozdziałów. Rozprawę otwiera wstęp (Rozdział 1) uzasadniający podjęcie tematyki kół typu Beveloid w przekładniach wykonywanych z tworzyw polimerowych znajdujących zastosowanie przede wszystkim w przemyśle elektromaszynowym w sektorze AGD.

W rozdziale tym Doktorant stawia hipotezę iż *„Koła zębate typu Beveloid wykonane z tworzyw polimerowych dzięki swojej geometrii powinny się przyczynić do polepszenia jakości pracy przekładni zębatych stosowanych w urządzeniach sektora elektromaszynowego”*, którą w kolejnych rozdziałach udowadnia. Cel rozprawy, którym jest opracowanie metodologii doboru geometrii kół Beveloid ma udowodnić hipotezę pracy, poprzez analizy numeryczne śladu współpracy, liczby przyporu i wytrzymałości, a także przez badania stanowiskowe. W dalszej części rozdziału 1 Doktorant charakteryzuje koła Beveloid, geometrię i rozkład sił w przekładni.

Rozdział drugi poświęcony jest metodom modelowania kół zębatych Beveloid, a mianowicie metodzie bezpośredniej symulacji obróbki w środowisku systemu CAD i metodzie opartej na matematycznym opisie generowanych powierzchni. Metody modelowania obejmują zarówno koła o zębach prostych jak i śrubowych. W krótkim, ale ważnym podrozdziale 2.3 dokonano porównania metod dla 4 różnych kół wskazując obszary największych różnic, które w wymiarze liniowym nie przekraczają maksimum kilku setnych milimetra, a w ujęciu bezwymiarowym maksimum paru setnych procenta. Ważnym elementem procesu modelowania kół zębatych jest zdefiniowanie powierzchni przejścia u podstawy zęba. Temu zagadnieniu poświęcony jest podrozdział 2.4. Podrozdział 2.4 zawiera opis modelowania metodą symulacyjną i analityczną powierzchni przejścia u podstawy zęba, zaś porównanie tych metod zawarto w podrozdziale 2.5.

W rozdziale trzecim Doktorant zajmuje się zagadnieniami związanymi z analizą współpracy kół zębatych Beveloid. Analizy tej dokonano wykorzystując środowisko programu CAD i MES. Na uwagę zasługuje tu sposób wyznaczania śladu styku finalnie w środowisku CAD, lecz określenie wielkości obszaru wynika z analizy zjawiska kontaktowego w środowisku MES przekładni do której przyłożono rzeczywiste obciążenie. Rozdział 3 zawiera analizę współpracy zębów ilustrowaną wieloma wykresami m. inn. pokazującymi zależności powierzchni śladu styku w funkcji kąta obrotu koła Beveloid dla zębów prostych i śrubowych (w pracy nie podano dla jakiego kąta β prowadzono badania), a także dla różnych „kątów zwężenia wieńca” δ koła zębatego. W rozdziale tym przedstawiono również zależności i wyniki badań wpływu „kąta zwężenia wieńca” δ na naprężenia u podstawy zęba oraz na powierzchniach bocznych zęba dla kół o zębach prostych i śrubowych uwzględniając w tym kąt obrotu koła.

Rozdział 4 to badania stanowiskowe przekładni z kołami Beveloid, których celem było sprawdzenie zachowania się tego typu przekładni w rzeczywistych warunkach pracy. Stanowisko badawcze wyposażono w kamerę termowizyjną i czujnik poziomu ciśnienia akustycznego. Koła mieszczące się w 9 klasie dokładności wykonane z poliamidu w

technologii SLS (48 kół) zestawiono w 24 przekładniach o różnych parametrach (liczby zębów, moduł, kąty δ i β , szerokości wieńców, itd.). Badano zależność wpływu kąta δ na średnią wartość temperatury na powierzchni bocznej zęba oraz na poziom ciśnienia akustycznego dla kół o zębach prostych i śrubowych. Wyniki badań zestawiono w tabelach i zilustrowano wykresami. W podsumowaniu tego rozdziału zaznaczono, że wraz z dotarciem się przekładni następuje obniżenie nagrzewania się powierzchni bocznych zębów, zaś najniższe temperatury rejestrowano dla wartości kąta δ od 1 do 3 stopni. Badania ciśnienia akustycznego wykazują analogiczny, jak w przypadku temperatur, wpływ kąta δ na poziom ciśnienia, tzn. w przedziale od 1 do 3 stopni występuje najniższy poziom ciśnienia akustycznego.

Rozdział 5 zatytułowany „Praktyczne wykorzystanie kół zębatych typu Beveloid” odnotowuje 3 przykłady zastosowania kół Beveloid w konkretnych rozwiązaniach: mechanizmu maszyny do mielenia (wzór przemysłowy UHRW 590494), mieszarki do powideł i układu kierowniczego bolidu klasy Formuła Student. W przypadku maszyny do mielenia i mieszarki do powideł wsparcie finansowe Centrum Innowacji i Transferu Technologii Politechniki Rzeszowskiej pozwoliło na wykonanie i przebadanie mechanizmów tych urządzeń w których zastosowano koła Beveloid. Badania prototypu trwałościowe, a zwłaszcza poziomu ciśnienia akustycznego mechanizmu maszyny spełniały ponad normę założenia projektu. W rozdziale tym szeroko opisano konstrukcję i badania układu kierowniczego bolidu klasy Formuła Student w dwóch wersjach: listwa zębata – koło Beveloid i listwa zębata – koło walcowe. Wyniki badań naprężeń u podstawy zęba jak i stykowych są korzystniejsze dla układu listwa zębata – koło walcowe, jednakże biorąc pod uwagę wrażliwość (różnice w luzie obwodowym) korzystniejsze rozwiązanie jest z kołem Beveloid. Rozdział ten jest bardzo ważnym rozdziałem rozprawy, a mianowicie pokazuje aplikacyjność tematyki dysertacji.

Rozdział 6 to „Wnioski i kierunki dalszych prac”. Doktorant dokonuje podsumowania rozważań teoretycznych i wyników badań konkludując, i tu zgadzam się z tym spostrzeżeniem, że duża liczba zmiennych parametrów nie pozwala na jednoznaczne wskazanie wartości kąta δ , przy którym przekładnie z tworzyw polimerowych odznaczałyby się równomiernością przenoszenia momentu obrotowego, prawidłowym śladem współpracy (kształtem, wielkością i położeniem), cichobieżnością i trwałością.

Zaproponowane kierunki dalszych prac, a mianowicie badanie wpływu kąta δ na sprawność przekładni i badanie niedokładności montażu na jakość pracy przekładni są logiczną kontynuacją zaprezentowanych w rozprawie rozważań, badań i aplikacji.

2. Uwagi szczegółowe

Recenzowana praca poprawna od strony merytorycznej i zastosowanych metod badawczych nie jest wolna od uchybień, niekiedy niejednoznacznych sformułowań czy też wręcz usterek edycyjnych. Przede wszystkim Doktorant powinien zamieścić przegląd literatury dając obraz aktualnego stanu wiedzy w zakresie kół Beveloid wykonywanych z tworzyw polimerowych. Na tym tle sformułowany cel wiązałby merytoryczne istniejące rozdziały dysertacji. Warto też by doprecyzować sformułowanie zawarte w celu pracy czy też w hipotezie, co Doktorant rozumie przez „najlepszą jakość pracy kół/przekładni”. Uważam, że niepoprawne jest używanie występującego na wielu stronach w tekście i wykresach określenia „kąta zwężenia koła”, a tym bardziej ‘kąta zwężenia wieńca’ (str.15) czy też „kąta zwężenia Beveloidalnego” – np. Tabela 2.1/2.2 na str. 28/29. W literaturze używane są inne określenia: *conical angle* – *kąta stożkowy* (Computer Assisted Methods in Engineering and Science), *cone angle* – *kąta stożka* (Journal of Mechanical Design), *pitch angle* naprzemiennie z *cone angle* (Gear Technology). Są to przecież koła stożkowe o stałej wysokości zębów i kilkustopniowym kącie stożka podziałowego δ , o przecinających się w jednym punkcie osiach

i kilkustopniowym kącie między osiami Σ . W jednej z publikacji w Gear Technology autorstwa H. Stadtfelda występuje określenie: *pinion/gear pitch angle*. Wielokrotnie też (str. 43-47) niepoprawnie terminologicznie używane jest określenie „na węższej/szerszej powierzchni czołowej”. Chodzi tu o średnicę od zewnętrznej czy wewnętrznej strony wieńca zębatego – analogia z kołem stożkowym. Niewłaściwe moim zdaniem z punktu widzenia metrologicznego jest określenie stanu powierzchni boku zęba uzyskanego w wyniku symulacji obróbki jako powierzchni graniastej. Graniastość, owalność związana jest z odchyłką okrągłości (błędy kształtu), chyba że tylko dla własnego zdefiniowania stanu powierzchni boku zęba uznamy, iż przecięcia mikropowierzchni powstałych w wyniku ruchu obwiedniowego lub operacji odejmowania brył (symulacja obróbki w środowiskach CAD) tworzą krawędzie nadając jej niewyglądony, wielokątny – „graniasty” charakter powierzchni. Uzupełnienia wymaga informacja o obciążeniach przyjmowanych w czasie teoretycznych analiz wytrzymałościowych, co pozwoli na odniesienie się do otrzymanych wyników. Tym bardziej powinien być mierzony, ustawiany moment oporowy hamulcem tarczowym na stanowisku badawczym. Brak pomiaru i ustawianie niekontrolowane może prowadzić do uszkodzenia przekładni badanej, zaś pomiar temperatury (nawet uśredniony) i ciśnienia akustycznego może budzić wątpliwości z uwagi na niepowtarzalność ustawiania obciążenia hamulcem tarczowym. Warto też uzupełnić jednostki na osiach odciętych i rzędnych na wielu wykresach jak np. rys. 3.2, 3.7, 3.15, 3.17 i wielu innych by poprawić czytelność rozprawy. Doktorant przedstawił wnioski końcowe i kierunki dalszych badań. Te ostatnie będą wymagały budowy zapowiadanego nowego stanowiska. Inne, bardzo szczegółowe uwagi jak np. tzw. literówki i uwagi edycyjne nie wymagające formalnego zapisu w recenzji zostaną przekazane bezpośrednio Autorowi.

3. Ocena ogólna rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Strojnego pt. „Geometria uzębienia typu Beveloid w przekładniach polimerowych” ujmuje kompleksowo zagadnienia związane z procesem modelowania geometrii, oceny wytrzymałościowej oraz analizy ząbienia przekładni. Praca została zaprezentowana na 140 stronach, zawiera 122 rysunki i 26 tabel. Literatura cytowana w pracy obejmuje 87 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych w tym również opracowania współautorskie Doktoranta związane z tematyką rozprawy. Pozycję nr 88 dołączoną do spisu literatury jest wzór przemysłowy nr UHRW 590494. Na szczególne podkreślenie zasługuje aktualność cytowanej w pracy literatury, co świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy. Ponadto szczególnie wartościowym jest współautorstwo wraz z Promotorem wzoru przemysłowego na elektryczną maszynkę kuchenną do mięsa (nr UHRW 590494 z 2014r.).

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska “ Geometria uzębienia typu Beveloid w przekładniach polimerowych” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie mgr inż. *Piotr Strojnego* do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Warszawa, 5.03.2016r.



Dzień dobry,

Szanowny Panie Dziekanie,

W załączeniu przesyłam w formacie pdf i docx recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Strojnego. Oryginał wyślę pocztą na adres dziekanatu Wydz. BMiL. Mam też przy okazji prośbę co do dnia obrony. Jeśli byłoby to możliwe, by nie szukać zastępstwa w zajęciach dydaktycznych, dniem w którym nie mam zajęć jest wtorek.

Uprzejmie proszę o potwierdzenie otrzymania poczty.

Z wyrazami szacunku.

Piotr Skawiński