

WPLYW DOBORU MATERIAŁU PRZEKŁADNI ZĘBATEJ NA ASPEKTY TECHNICZNO - EKONOMICZNE

W artykule wykonano analizę techniczno-ekonomiczną projektu przekładni jednostopniowej o zębach prostych, o możliwie najmniejszych gabarytach, w kontekście konstrukcji oraz kosztów wykonania przekładni w zależności od przyjętego materiału. Przedstawiono przybliżone ceny oraz gabaryty projektowanych na potrzeby przemysłu przekładni z dostępnych obecnie na rynku materiałów. Ostatecznie określono najkorzystniejsze rozwiązanie z punktu widzenia założeń produkcyjnych i warunków pracy.

WSTĘP

Przekładnia mechaniczna [1] jest to napęd mechaniczny służący do przenoszenia ruchu obrotowego z wału czynnego (napędzającego) na wał bierny (napędzany). Podstawowym zadaniem przekładni mechanicznej jest przeniesienie energii z wału czynnego na wał bierny, a ponadto dokonanie zmiany wartości momentu obrotowego, prędkości oraz sił.

Reduktory używane są we wszystkich gałęziach przemysłu. Zostały zaprojektowane aby redukować prędkość wału napędowego, a zarazem zwiększać moment obrotowy. Miały (i nadal mają) zastosowanie zarówno w silnikach parowych, gazowych, elektrycznych czy dieslowskich. Podstawą konstrukcji przekładni są koła zębate.

Najbardziej rozpowszechnione są koła zębate walcowe o różnych kształtach zębów - z zębami prostymi, skośnymi lub daszkowymi. Koła zębate walcowe o zębach prostych są łatwiejsze do wyprodukowania. W czasie pracy przekładni w zazębieniu pozostaje jedna para zębów. Tym samym przenoszona przez taką przekładnię moc jest ograniczona.

Koła zębate o zębach skośnych są trudniejsze w obróbce mechanicznej i generalnie droższe od analogicznego koła walcowego o zębach prostych. Za to dla zadanej mocy mogą być mniejsze i bardziej kompaktowe. Jednocześnie zdolne są do przenoszenia obciążenia o ok. 50% większego niż koła walcowe. Wynika to z faktu, że podczas pracy kół walcowych o zębach skośnych podczas styku współpracuje więcej par zębów jednocześnie niż w przypadku kół o zębach prostych. Do wad tego typu zazębienia należy dodatkowe obciążenie osiowe wałów, będące skutkiem działania jeszcze jednej składowej powstającej wskutek pochylenia linii zęba.

Do produkcji komponentów przekładni konieczny jest odpowiedni dobór materiałów. Niezbędna jest wysoka wytrzymałość przekładni aby zapobiec wyłamaniom czy wykruszeniom zębów. Jednocześnie odpowiednia twardość materiału uzyskiwana w drodze obróbki cieplnej lub cieplno-chemicznej przekłada się na zdolność do przenoszenia naprężeń w styku zazębienia.

Odpowiedni dobór materiałów ma także niebagatelny wpływ na gabaryty oraz w konsekwencji na masę przekładni. Zastosowanie lepszego materiału pozwala na np. zmniejszenie szerokości wieńców kół zębatych.

1. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ PRZEKŁADNI

W celu zaprojektowania, trzech przekładni jednostopniowych, o zębach prostych, o możliwie najmniejszych gabarytach, wykonano analizę techniczno-ekonomiczną dającą odpowiedź na pytanie:

- jakie są koszty wykonania poszczególnych przekładni wykonanych z różnych materiałów, stosowanych do wykonania kół zębatych
- jak wypadnie porównanie kosztów zaprojektowanych przekładni do cen przekładni dostępnych obecnie w sprzedaży?

W celu poznania wpływu doboru materiału kół zębatych zębów na aspekty techniczno-ekonomiczne, analizie poddano przekładnię przemysłową stosowaną w napędzie podajnika węgla surowego, o następujących parametrach:

- moc znamionowa przekładni $P = 7,5$ [kW],
- prędkość obrotowa na wejściu $n_1 = 1500$ [obr/min],
- przełożenie $i = 4,5$,
- warunki pracy - ciężkie,
- czas pracy na dobę - 16 [h],
- produkcja jednostkowa - 10 [szt.].

Dla przedmiotowej przekładni wprowadzono szereg założeń i wymagań dodatkowych:

- a) maksymalna zwartość (minimalny, dopuszczalny rozstaw osi, co powinno wpłynąć na zmniejszenie kosztów wykonania przekładni oraz zwiększenie możliwości swobodnej zabudowy),
- b) ograniczenie kosztów serwisowania oraz kosztów przestoju maszyny,
- c) łatwa dostępność części zamiennych na rynku (znormalizowane łożyska i uszczelnienia). Zastosowanie nieznormalizowanych komponentów spowoduje wzrost kosztów eksploatacji urządzenia).

Celem przeprowadzenia analizy związanej z doбором materiału, zaprojektowano model przekładni zębatej przedstawiony na rysunku 1.

Dokonano analizy czterech modeli tej samej przekładni różniące się między sobą materiałem z którego zostanie ona wykonana:

- Model A – materiał C45,
- Model B – materiał 17CrMoV5,
- Model C – materiał 30CrV9,
- Model D – materiał 37Cr4.



Rys. 1. Model przekładni zębatej

2. OBLICZENIA PRZEKŁADNI

Obliczenia przekładni dla zdefiniowanych modeli wykonano w programie Autodesk Inventor Professional 2017 [2], [3], [4]. Właściwości mechaniczne poszczególnych materiałów przedstawiono w tabeli 1, zaś zestawienie kluczowych – obliczonych - parametrów przekładni dla poszczególnych modeli zestawiono w tabeli 2.

Nietrudno zauważyć, że przy zastosowaniu materiałów o lepszych właściwościach mechanicznych masa znacząco spada. Dla skrajnych wartości występuje ponad 20 kg różnicy. To znaczy, że np. koło wykonane z materiału 37Cr4 jest ponad 3 razy lżejsze od tego wykonanego z materiału 17CrMoV5.

Wraz ze zmianą materiałów zmieniają się gabaryty kół zębatych, a tym samym całej przekładni. W przypadku zastosowania materiału o lepszych właściwościach, długość zęba (szerokość wieńca koła) jest mniejsza. Dla materiału C45 długość zęba wynosi 50 mm, dla 17CrMoV5 – 40 mm, zaś dla materiałów 30CrV9 i 37Cr4 już tylko 10 mm. Na tym etapie rozważań nie ma jeszcze możliwości udzielenia odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób mniejsza ilość zużytego, droższego materiału wpłynie na koszty.

Dobór materiału ma również wpływ na czas pracy przekładni. Pod tym względem najlepiej wypadają materiały 30CrV9 i 37Cr4, dla których podstawowa liczba cykli obciążenia w kontakcie wynosi 10 mln. Zasadnicze znaczenie na jakość wykonanych kół zębatych ma obróbka cieplna. Stal konstrukcyjna C45 oraz stal 17CrMoV5 to stale utwardzana cieplnie, stal 30CrV9 to stal azotowana, natomiast stal 37Cr4 to stal nitrowęgla.

Obróbka cieplna wpływa korzystnie na obrabiany element, zwiększa jego twardość oraz wytrzymałość, ale równocześnie podnosi koszty wykonania przekładni.

3. WYCENA PRZEKŁADNI

Z punktu widzenia dzisiejszych przedsiębiorstw jednym z głównych celów ich funkcjonowania jest maksymalizacja zysków. Co za tym idzie dąży się do tego, aby koszty pozyskiwanych surowców, maszyn itp. były możliwie jak najmniejsze. Nie należy jednak zapominać, że oczekiwany jest produkt dobrej jakości, w rozsądnie wyważonej cenie. Tak więc czynnikiem zasadniczym podczas wyboru przekładni zębatej nie powinna być najniższa cena, lecz stosunek jakości do ceny.

Tab. 1. Właściwości materiałów

		C45	17CrMoV5	30CrV9	37Cr4
Granica wytrzymałości na rozciąganie	S_u	640 MPa	800 MPa	800 MPa	1570 MPa
Granica plastyczności	S_y	390 MPa	500 MPa	600 MPa	1350 MPa
Moduł sprężystości	E	206000 MPa	206000 MPa	206000 MPa	206000 MPa
Współczynnik Poissona	μ	0,300	0,300	0,300	0,300
Wytrzymałość zmęczeniowa w zginaniu	σ_{Flim}	410,0 MPa	414,0 MPa	705,0 MPa	740,0 MPa
Wytrzymałość zmęczeniowa w kontakcie	σ_{Hlim}	520,0 MPa	615,0 MPa	1180,0 MPa	1288,0 MPa
Twardość w rdzeniu zęba	JHV	210	210	210	210
Twardość na boku zęba	VHV	800	615	800	615
Podstawowa liczba cykli obciążenia w zginaniu	N _{Flim}	3000000	3000000	3000000	3000000
Podstawowa liczba cykli obciążenia w kontakcie	N _{Hlim}	50000000	50000000	100000000	100000000

Tab. 2. Podstawowe (obliczone) parametry przekładni

		C45		17CrMoV5		30CrV9		37Cr4	
Przełożenie przekładni		4,353		4,4		4,4		4,4	
Odległość osi [mm]		250		224		224		224	
Roboczy kąt nacisku [°]		19,842		20,861		20,861		20,861	
Liczba przyporu		1,6719		1,6016		1,6016		1,6016	
Odchylenie graniczne równoległości osi X [mm]		0,014		0,012		0,0095		0,0095	
Odchylenie graniczne równoległości osi Y [mm]		0,007		0,006		0,0047		0,0047	
Liczba zębów		17	74	15	66	15	66	15	66
Korekcja jednostkowa [mm]		0	-0,045	0	0,232	0	0,232	0	0,232
Długość zęba [mm]		50	50	40	40	10	10	10	10
Ścięcie głowy zęba [mm]		0,0002	0,0002	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
Wierzchołkowy kąt nacisku [°]		32,77	23,64	33,94	25,04	33,94	25,04	33,94	25,04
Masa kół zębatych [kg]		29,671		27,553		8,47		7,85	

Tabela 3 przedstawia zestawienie kosztów pojedynczych elementów każdego z modeli przekładni, wykonanych z różnych materiałów.

Tab. 3. Zestawienie kosztów elementów przekładni zębatej

Element	Ilość sztuk	C45	17CrMoV5	30CrV9	37Cr4
Łożysko SKF 619072RS1	2	360 PLN	360 PLN	360 PLN	360 PLN
Łożysko SKF 62/222RS1 2	2	80 PLN	80 PLN	80 PLN	80 PLN
Wał czynny	1	80 PLN	80 PLN	80 PLN	80 PLN
Wał bierny	1	50 PLN	50 PLN	50 PLN	50 PLN
Przekładnia zębata	1	440 PLN	550 PLN	1070 PLN	1290 PLN

PODSUMOWANIE

Dobór rodzaju materiału użytego do konstrukcji kół zębatach przekładni ma decydujący wpływ na jej gabaryty, trwałość, masę oraz cenę.

W procesie projektowania przekładni konieczny jest wybór między dwoma aspektami – technicznym oraz ekonomicznym i znaleźć rozwiązanie, które spełnia zakładane kryteria.

Stosując materiały droższe, ale bardziej wytrzymałe, także ulepszone poprzez obróbkę cieplną lub cieplno-chemiczną, możliwe jest zmniejszenie wymiarów gabarytowych i masy urządzenia oraz znaczne zwiększenie jego trwałości. Skutkuje to jednak znacznym wzrostem kosztów wytworzenia poszczególnych komponentów.

Wykonanie przekładni taniej, oznacza podzespół o dużych gabarytach, masie i stosunkowo niższej trwałości.

Z punktu widzenia przedsiębiorstw produkcyjnych najkorzystniejsze jest rozwiązanie łączące w sobie zwartą konstrukcję o niskiej masie, o odpowiedniej wytrzymałości, trwałości i przystępnej cenie.

Projektując urządzenie pod kątem atrakcyjności dla potencjalnego klienta, należy stosować rozwiązania kompromisowe. Wobec powyższego, najlepszym rozwiązaniem spośród przeanalizowanych rozwiązań wydaje się być przekładnia wykonana ze stali stopowej 17CrMoV5, utwardzanej cieplnie. W stosunku do najtańszej przekładni wykonanej ze stali C45, otrzymano mniejsze gabaryty (szerokość kół zębatach) oraz lepsze własności wytrzymałościowe, przy niewiele większej cenie.

Przekładnie wykonane ze stali stopowych 30CrV9 oraz 37Cr4, mimo znacznie lepszych parametrów wytrzymałościowych oraz mniejszych gabarytów (czterokrotnie mniejsza szerokość kół), mają ponad dwukrotnie wyższą cenę, ze względu na konieczność przeprowadzenia skomplikowanych i drogich operacji azotowania i nitrowania.

W przypadku urządzeń takich jak reduktory, masa i gabaryty nie zawsze są decydującymi parametrami. Z punktu widzenia założeń

konstrukcyjnych i warunków pracy jako optymalną wybrano przekładnię wykonaną ze stali stopowej 17CrMoV5 utwardzanej cieplnie, łączącą w sobie dobrą wytrzymałość i trwałość, zmniejszone gabaryty oraz kompromisową cenę (traktując jako punkt odniesienia przekładnię wykonaną z podstawowego materiału – stali C45).

BIBLIOGRAFIA

1. Płuciennik P., Maciejczyk A., *Wpływ doboru rodzaju nacięcia zęba na aspekty techniczno-ekonomiczne przekładni zębatej*, Autobusy-Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2016, nr 6
2. Płuciennik P., *Projektowanie elementów maszyn z wykorzystaniem programu Autodesk Inventor. Obliczenia przekładni*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
3. PN-ISO 6336-2:2000, *Przekładnie zębata walcowe - Obliczanie nośności kół - Wytrzymałość zęba na zmęczenie stykowe (pitting)*.
4. Maciejczyk A. Zdziennicki Z., *DESIGN BASIC OF INDUSTRIAL GEAR BOXES Calculation and Design Case Example* – Łódzka Regionalna Biblioteka Cyfrowa CYBRA, <http://cybra.lodz.pl/dlibra/results?action=SearchAction&skipSearch=true&mdirids=&server%3Atype=both&tempQueryType=-3&encode=false&isExpandable=on&isRemote=off&roleId=-3&queryType=-3&dirids=89&rootid=&query=maciejczyk&localQueryType=-3&remoteQueryType=-2>

Influence of material selection of gear for technical – economic aspects

The article presented technical and economic analysis of the single-stage gear with straight teeth, with the smallest possible dimensions, in the context of design and cost of performance of gear depending on the adopted material. It was showed the approximate prices and dimensions designed for the needs of industry gears using materials available on the market today. Finally determined the best solution in view of the manufacturing and working conditions.

Autorzy:

dr inż. **Paweł Płuciennik** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn

dr inż. **Andrzej Maciejczyk** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn