

ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH TECHNOLOGII OBRÓBKI KÓŁ ZĘBATYCH O UZĘBIENIU ZEWNĘTRZNYM NA WARUNKI SMAROWANIA PRZEKŁADNI ZĘBATYCH STOSOWANYCH W NAPĘDACH PRZENOŚNIKÓW TRANSPORTOWYCH

W ramach pracy określono, z użyciem zmodyfikowanej metody obliczeniowej opisanej w normie ISO/TR 15144-1:2014 (E), warunki smarowania typowych przekładni zębatych stosowanych w napędach przenośników. W szczególności zakres prac badawczych obejmował pomiary chropowatości 8 kół zębatych wytworzonych z użyciem trzech technologii wytwarzania. Następnym etapem prac było określenie, z wykorzystaniem wyznaczonych wartości chropowatości Ra, względnej grubości filmu olejowego λ dla kół zębatych wybranych przekładni zębatych. W obliczeniach wykorzystano parametry geometryczne, technologiczne i obciążeniowe zgodne z rzeczywistymi wartościami. Szeroki zakres prac doświadczalnych i obliczeniowych pozwolił na określenie szeregu spostrzeżeń, z których najważniejszymi są: wyznaczana chropowatość powierzchni zębów kół zębatych zależała od kierunku pomiaru, chropowatość mierzona wzdłuż linii zęba była mniejsza niż mierzona wzdłuż kierunku zarysu zęba, analizowane zębate są eksploatowane w warunkach smarowania granicznego lub mieszanego, niekorzystne warunki smarowania analizowanych par kół zębatych tworzących stopnie II lub III przekładni zębatych wynikały z relatywnie niskiej prędkości obrotowej i wysokiej wartości obciążenia.

WSTĘP

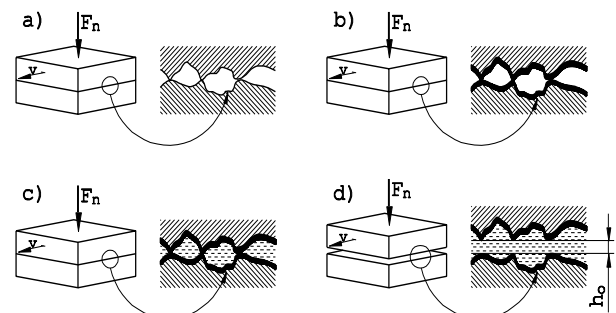
W poprawnie działających systemach utrzymania stanu technicznego, najważniejszym działaniem powinno być zapobieganie ewentualnym awariom. Czynnikiem zmniejszającym prawdopodobieństwo awarii jest zapewnienie właściwych warunków smarowania przekładni zębatych. Jednym z koniecznych czynników zapewniających wysoką trwałość eksploatacyjną ząbów kół zębatych jest zapewnienie właściwych warunków smarowania [1÷10,14]. Uzyskać je można poprzez dobór odpowiednich środków smarnych, jak i też technologii wytwarzania. O zastosowaniu konkretnych środków smarnych oraz parametrów determinujących wykorzystanie odpowiedniej technologii obróbki kół zębatych decyduje konstruktor na etapie obliczeń wytrzymałościowych. Jednakże konstruktorzy rzadko przeprowadzają obliczenia wytrzymałości na mikropitting, które wymagają wyznaczenia względnej grubości filmu olejowego λ . Parametr ten charakteryzuje stopień rozdziału nierówności współpracujących powierzchni, a tym samym rodzaj tarcia występujący między tymi powierzchniami.

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}} \quad (1)$$

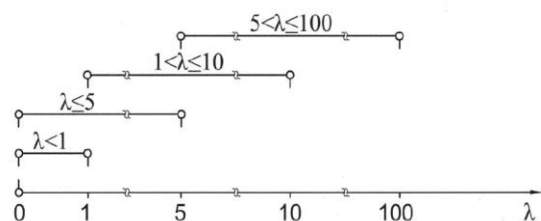
gdzie:

- h_{\min} – minimalna grubość obliczeniowa warstwy środka smarnego,
- $Ra_{1,2}$ –chropowatość powierzchni.

Na rysunku 1. przedstawiono w sposób poglądowy rodzaje tarcia [2], natomiast na rysunku 2 - kryteria smarowania [11], na podstawie którego można dokonać podziału warunków smarowania.



Rys.1. Rodzaje tarcia, a –suche, b – graniczne, c - mieszane, d - płynne [2].



Rys.2. Zakresy wartości parametru λ umożliwiające podział warunków smarowania (opis w tekście) [11].

Smarowanie graniczne występuje w przypadku, gdy $\lambda \leq 1$. Współpraca zębów kół zębatych jest klasycznym przykładem par kinematycznych o ruchu toczo-ślizgowym, w których warunki smarowania elastohydrodynamicznego (EHD) uzyskuje się przy parametrze $1 < \lambda \leq 10$, przy czym uznaje się, że smarowanie mieszane występuje dla wartości $\lambda < 5$. Jednakże, według [9], w wartości względnej grubości filmu olejowego $1 < \lambda < 3$ dominującym

rodzajem tarcia jest tarcie mieszane, natomiast w zakresie wartości $\lambda < 3,10 >$ wytwarzają się warunki smarowania płynnego EHD (wyczerpujący opis teorii smarowania elastohydrodynamicznego EHD można znaleźć w pracy [10]) charakteryzujące się powstaniem warstwy filmu olejowego o grubości przewyższającej nierówność powierzchni. Powyżej wartości względnej grubości filmu olejowego $\lambda > 10$ występuje tarcie płynne (HD). Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto nazewnictwo, że w zakresie $\lambda = (0,1)$ występuje tarcie graniczne, $\lambda = (1,3)$ – tarcie mieszane, natomiast dla wartości $\lambda < 3,10 >$ wytwarzają się warunki płynnego smarowania EHD.

Na warunki smarowania przekładni zębatych ma wpływ szereg czynników konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. Zasadniczym celem niniejszej pracy było określenie rodzaju procesów technologicznych stosowanych do wytwarzania kół przekładni zębatych oraz analiza wpływu tych technologii na warunki smarowania uzębień tych przekładni.

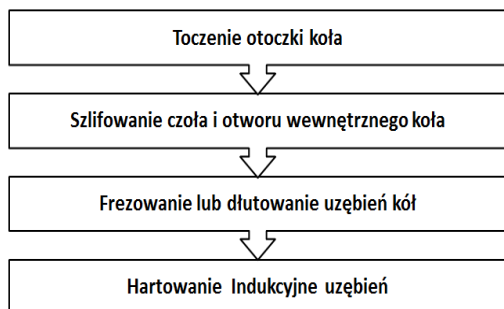
Zakres niniejszego opracowania obejmował:

1. Analizę najczęściej stosowanych technologii wytwarzania kół zębatych o uzębieniu zewnętrznym.
2. Określenie chropowatości wybranych kół wykonanych w różnych technologiach.
3. Modyfikacja metody opisanej w normie ISO/TR 15144-1:2014 (E) ukierunkowana na wyznaczenie przebiegu względnej grubości filmu olejowego.
4. Wyznaczenie przebiegu względnej grubości filmu olejowego dla geometrii uzębienia przekładni zębatej z walcowymi kołami zębatymi o uzębieniu zewnętrznym.
5. Sformułowanie zaleceń dla poprawy warunków smarowania przekładni zębatych.

1. ANALIZA STOSOWANYCH TECHNOLOGII WYTWARZANIA KÓŁ ZĘBATYCH O UZĘBIENIU ZEWNĘTRZNYM.

Można wyróżnić zasadniczo trzy główne technologiczne metody wytwarzania walcowych kół zębatych o uzębieniu zewnętrznym [12].

Metoda I – stosowana do wytwarzania kół walcowych o uzębieniu zewnętrznym o dokładności wykonania wg PN-ISO 1328 ≥ 8 . W przypadku tej metody (Rys. 3) stosuje się procesy toczenia otoczki koła, szlifowania powierzchni czołowej i otworu wewnętrznego koła, obwodniowe frezowanie z użyciem frezu ślimakowego lub dłutowanie dłutakiem uzębienia ewolwentowego zewnętrznego metodą Fellowsa, opcjonalnie stosowane jest dłutowanie wpustów. Ostatnim etapem wytwarzania kół jest hartowanie uzębień kół zębatych (Rys. 4). Koła wytworzone w tej technologii cechują się niską jakością wykonania.

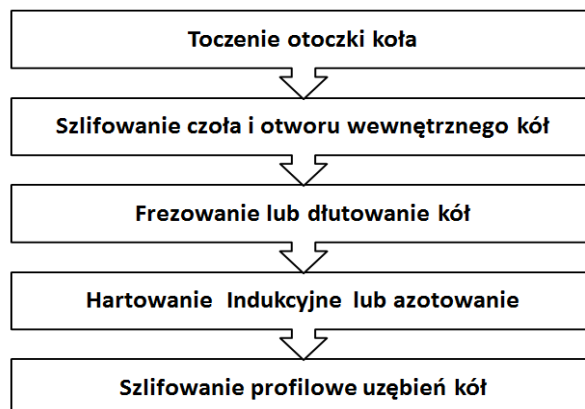


Rys.3 Podstawowe procesy technologiczne stosowane do wytwarzania kół walcowych o uzębieniu zewnętrznym o dokładności wykonania wg PN-ISO 1328 ≥ 8

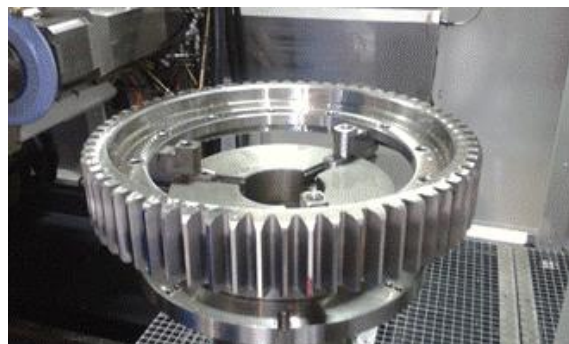


Rys.4Widok uzębienia kół zębatych poddanych hartowaniu powierzchniowemu.

Metoda II – stosowana do wytwarzania kół walcowych o uzębieniu zewnętrznym o dokładności wykonania wg PN-ISO 1328 w zakresie klas 6÷7. W przypadku tej metody (Rys. 5) stosuje się procesy toczenia otoczki koła, szlifowania powierzchni czołowej i otworu wewnętrznego koła, obwodniowe frezowanie z użyciem frezu ślimakowego (lub dłutowanie dłutakiem uzębienia ewolwentowego zewnętrznego metodą Fellowsa, opcjonalnie stosowane jest dłutowanie wpustów. Przedostatnim etapem wytwarzania kół jest hartowanie uzębień kół zębatych, które są następnie szlifowane profilowo (Rys. 6) tarczami szlifierskimi uniwersalnymi (etapy szlifowania zgrubnego i wykańczającego stosowane są z użyciem tej samej tarczy).



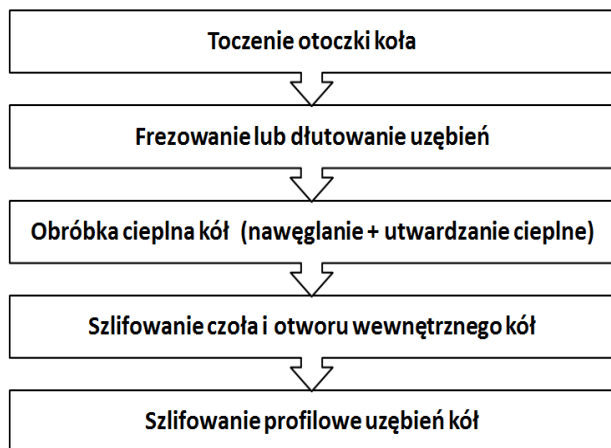
Rys. 5. Podstawowe procesy technologiczne stosowane do wytwarzania kół walcowych o uzębieniu zewnętrznym o dokładności wykonania wg PN-ISO 1328 w zakresie klas 6÷7



Rys. 6. Widok koła zębatego po hartowaniu powierzchniowym w trakcie szlifowania profilowego

Metoda III – stosowana do wytwarzania kół walcowych o uzębieniu zewnętrznym o dokładności wykonania wg PN-ISO 1328 w zakresie klas <6 i wykorzystywana w wysoko obciążonych przekładniach zębatych. W przypadku tej metody (Rys. 7) stosuje się

procesy toczenia otoczki koła, obwodniowe frezowanie z użyciem frezu ślimakowego lub dłutowanie dłutakiem uzębienia ewolwentowego zewnętrznego metodą Fellowsa, nawęglanie (Rys. 8), opcjonalnie stosowane jest usuwanie warstwy nawęglonej w otworze wewnętrznym, utwardzanie cieplne, szlifowania powierzchni czołowej i otworu wewnętrznego koła, dłutowanie wpustów lub wielowypustów. Ostatnim etapem wytwarzania kół jest szlifowane profilowe tarczami szlifierskimi uniwersalnymi. Koła wytworzone w tej technologii cechują się wysoką jakością wykonania.



Rys. 7. Podstawowe procesy technologiczne stosowane do wytwarzania kół walcowych o uzębieniu zewnętrznym o dokładności wykonania wg PN-ISO 1328 w zakresie klas 6÷7 stosowane w walcowych i kąto-walcowych przekładniach zębatych o mocy przenoszonej większej od 75 kW i mniejszej od 132 kW



Rys. 8. Widok kół zębatach po procesie nawęglania

2. POMIARY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI KÓŁ ZĘBATYCH

Pomiary chropowatości powierzchni uzębienia przeprowadzono dla kół wytworzonych z wykorzystaniem wszystkich 3 wymienionych w poprzednim rozdziale metod wytwarzania kół zębatach. Rozpatrywano następujące koła:

Dla Metody I – pomiarami objęto parę kół tworzącą stopień II przekładni kąto-walcowej o mocy przenoszonej 22 kW i stosowanej w lekkich przenośnikach zgrzeblowych,

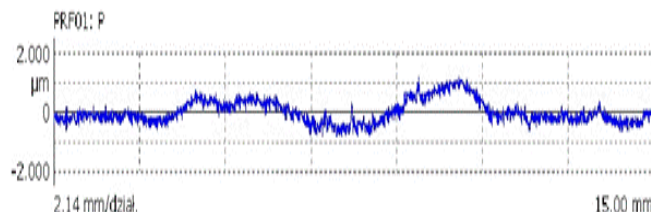
Dla Metody II – pomiarami objęto parę kół tworzącą stopień II przekładni walcowej o mocy przenoszonej do 132 kW stosowanej w przenośnikach taśmowych,

Dla Metody III – pomiarami objęto 5 kół tworzących stopień planetarny (II) przekładni kąto-planetarnej o mocy przenoszonej 30 kW stosowanej w lekkich przenośnikach zgrzeblowych.

Do pomiaru chropowatości powierzchni zębów kół wykorzystano chropowatościomierz firmy MAHR typu MarWin (Rys. 9.). Pomiar chropowatości parametru Ra wykonywano na 5 powierzchniach zębów i dla dwóch kierunków przesuwu głowicy pomiarowej: wzdłuż linii zęba i wzdłuż zarysu zęba. Na rysunku 10. przedstawiono przykładowy profilogram uzyskany w trakcie pomiarów.



Rys. 9. Chropowatościomierz typu MarWin firmy MAHR



Rys. 10 Podstawowe Przykładowy profilogram uzyskany w trakcie pomiarów chropowatości powierzchni zębów.

W tabeli 1. przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości uzyskane dla kół wytworzonych zgodnie z Metodą I, w tabeli 2 - dla kół wytworzonych zgodnie z Metodą II, natomiast w tabeli 3 - dla kół wytworzonych zgodnie z Metodą III.

Analizując dane przedstawione w Tab. 1÷3 można zauważyć, że chropowatość powierzchni zależy od kierunku pomiaru oraz dla przypadku pomiaru wzdłuż linii zęba występują niższe wartości niż dla kierunku wzdłuż zarysu zęba. Wynika to zasadniczo z kierunku działania ściernicy przy szlifowaniu profilowym, która porusza się zgodnie z kierunkiem linii zęba. Skutkuje to wystąpieniem charakterystycznej powierzchni jak na Rys. 11.

Innymi spostrzeżeniami wynikającymi z analizy danych zawartych w Tab. 1÷3 są:

- najwyższe wartości chropowatości powierzchni występują dla nieszlifowanych kół hartowanych powierzchniowo (Metoda I),
- wartości chropowatości szlifowanych kół utwardzanych powierzchniowo (Metoda II i Metoda III) są zbliżone,
- chropowatość większości mierzonych powierzchni kół szlifowanych mieści się w zakresie założonym przez konstruktorów (konstruktorzy zazwyczaj nie określają wymaganego kierunku pomiaru chropowatości).

Tab. 1 Wyniki pomiarów chropowatości kół wytworzonych z zastosowaniem metody I

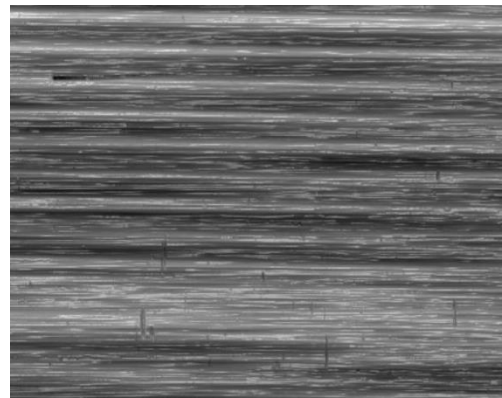
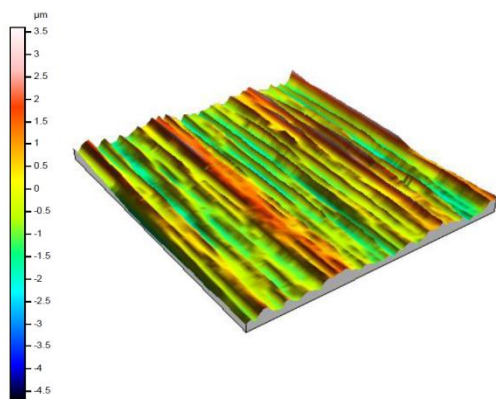
Dane koła poddanego pomiarom chropowatości	Zmierzona wartość chropowatości Ra, μm		
	wzdłuż linii zęba	wzdłuż zarysu zęba	
Koło napędzające (zębnik), z=18, m=5, Wymagana klasa dokładności wg PN-ISO 1328 – 7, Wymagana chropowatość zęba Ra=1,6μm	1,21	2,55	
	1,09	2,53	
	1,07	2,50	
	1,04	2,50	
Koło napędzane, z=50, m=5, Wymagana klasa dokładności wg PN-ISO 1328 – 7, Wymagana chropowatość zęba Ra=1,6μm	0,84	2,02	
	0,85	2,09	
	0,85	2,02	
	0,84	2,01	
	Średnia	0,97	2,28

Tab. 2 Wyniki pomiarów chropowatości kół wytworzonych z zastosowaniem metody II

Dane koła poddanego pomiarom chropowatości	Zmierzona wartość chropowatości Ra, μm		
	wzdłuż linii zęba	wzdłuż zarysu zęba	
Koło napędzające (zębnik), z=33, m=5, Wymagana klasa dokładności wg PN-ISO 1328 – 6, Wymagana chropowatość zęba Ra=0,8 μm	0,48	1,15	
	0,49	0,98	
	0,50	1,02	
	0,51	1,11	
Koło napędzane, z=73, m=5, Wymagana klasa dokładności wg PN-ISO 1328 – 6, Wymagana chropowatość zęba Ra=0,8 μm	0,29	0,73	
	0,29	0,68	
	0,30	0,71	
	0,25	0,65	
	Średnia	0,39	0,87

Tab. 3 Wyniki pomiarów chropowatości kół wytworzonych z zastosowaniem metody III

Dane koła poddanego pomiarom chropowatości	Zmierzona wartość chropowatości Ra, μm		
	wzdłuż linii zęba	wzdłuż zarysu zęba	
Koło słoneczne, z=16, m=5, Wymagana klasa dokładności wg PN-ISO 1328 – 6, Wymagana chropowatość zęba Ra=0,8 μm	0,13	0,77	
	0,11	0,89	
	0,15	0,92	
	0,11	0,71	
Koło satelitarne nr 1 z=31, m=5, Wymagana klasa dokładności wg PN-ISO 1328 – 6, Wymagana chropowatość zęba Ra=0,8 μm	0,21	Pomiar niemożliwy do przeprowadzenia z uwagi na dostęp końcówki pomiarowej	
	0,22		
	0,2		
	0,2		
	Średnia	0,21	0,81



Rys. 11. Profilogram 3D powierzchni zębów poddanych szlifowaniu profilowemu (A) i wizualizacja tej powierzchni (B).

3. METODA OBLICZENIA MINIMALNEJ GRUBOŚCI FILMU OLEJOWEGO

Występującą we wzorze (1) minimalną grubość [9] obliczeniową warstwy środka smarnego h_{min} można określić za pomocą ogólnego równania w postaci bezwymiarowej:

$$h_{min} = k \cdot U^c \cdot W^b \cdot G^c \cdot R^d \quad (2)$$

gdzie:

- R' – promień krzywizny,
- U – parametr prędkości,
- W – parametr obciążenia,
- G – parametr materiałowy.

Szereg badaczy zajmowało się wyznaczeniem parametrów charakterystycznych równania (2), z których każdy podaje inne wartości wykładników a, b, c i stałej k. Zestawienie tych wartości wg różnych autorów przedstawiono w pracy [7].

W niniejszej pracy, do obliczenia minimalnej grubości warstwy środka smarnego h_{min} , wykorzystano metodę opisaną w normie ISO/TR 15144-1:2014 (E) [13], która bazuje na badaniach Dowsona i Higginsona [9].

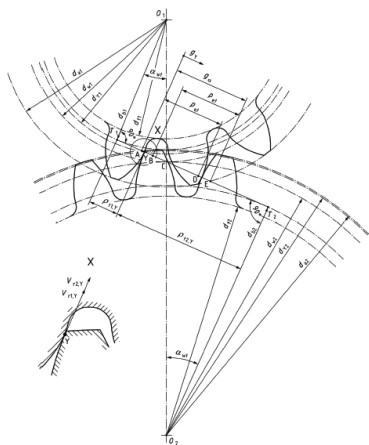
Równanie (2), w tej metodzie, przyjmuje postać:

$$h_{min} = 1600 \cdot U^{0,7} \cdot W^{-0,13} \cdot G^{0,6} \cdot S^{0,22} \cdot R^d \quad (3)$$

gdzie:

- S – parametr temperaturowy.

W normie ISO/TR 15144-1:2014 (E) obliczenia wartości względnej grubości filmu olejowego λ przeprowadza się tylko dla 5 punktów charakterystycznych na odcinku przyporu (punkty A, B, C, D i E na Rys. 12). W ramach niniejszego opracowania, przyjęto wartości grubości filmu olejowego wyznaczać także dla 106 innych punktów odcinka przyporu.



Rys. 12. Geometria koła zębatego o zarysie ewolwentowym zewnętrznym

W obliczeniach uwzględniono, zestawione w tablicy 4 parametry charakteryzujące rodzaj środka smarnego.

Tab. 4 Zestawienie parametrów charakteryzujących rodzaj środka smarnego

Rodzaj oleju	mineralny
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C	210 mm ² /s
Lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C	18,5 mm ² /s
Gęstość w temperaturze 15°C	895 kg/m ³

Obliczenia wartości względnej grubości filmu olejowego λ przeprowadzono dla 4 przekładni zębatych powszechnie stosowanych w napędach przenośników transportowych. Parametry geometryczne i konstrukcyjne uzębień rozpatrywanych kół i przyjęte wartości obciążeń przedstawiono w tablicach 5÷8.

Tab. 5. Podstawowe parametry geometryczne kół zębatych przekładni walcowej o mocy przenoszonej 132 kW stosowanej w przenośnikach taśmowych.

Rodzaj przekładni:	Kątowo-walcowa	
Stopień przekładni	II (walcowy)	
Metoda wytwarzania kół	I	
Moment wejściowy dla II stopnia	472 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla II stopnia	444,19 obr/min	
Moduł, mm	m	5
Klasa dokładności	-	7
Chropowatość	Ra	0,97/2,28 μ m/
Stopień przekładni	III (walcowy)	
Metoda wytwarzania kół	I	
Moment wejściowy dla III stopnia	1507 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla III stopnia	159,42 obr/min	
Moduł, mm	m	4
Chropowatość	Ra	0,97/2,28 μ m/

4. REZULTATY OBLICZEŃ

Wyniki obliczeń wartości względnej grubości filmu olejowego λ w funkcji położenia na odcinku przyporu kół górniczych przekładni zębatych przedstawiono na Rys. 13÷16.

Analizując przebiegi przedstawione na Rys. 13÷16, zauważa się, że w przypadku II i III stopnia analizowanych przekładni górniczych, smarowanie powierzchni odbywa się, bez względu na wartość chropowatości, w warunkach smarowania granicznego.

Tab. 6. Podstawowe parametry geometryczne kół zębatych przekładni walcowej o mocy przenoszonej do 132 kW stosowanej w przenośnikach taśmowych.

Rodzaj przekładni:	walcowa	
Stopień przekładni	I (walcowa)	
Metoda wytwarzania kół	II	
Moment wejściowy dla I stopnia	857 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla I stopnia	1470 obr/min	
Moduł, mm	m	5
Klasa dokładności	-	6
Chropowatość	Ra	0,87 μ m
Stopień przekładni	II (walcowa)	
Metoda wytwarzania kół	II	
Moment wejściowy dla II stopnia	2509 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla II stopnia	502,4 obr/min	
Moduł, mm	m	5
Klasa dokładności	-	6
Chropowatość	Ra	0,87 μ m
Stopień przekładni	III (walcowa)	
Metoda wytwarzania kół	II	
Moment wejściowy dla III stopnia	6810 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla III stopnia	185 obr/min	
Moduł, mm	m	6
Klasa dokładności	-	6
Chropowatość	Ra	0,39/0,87 μ m

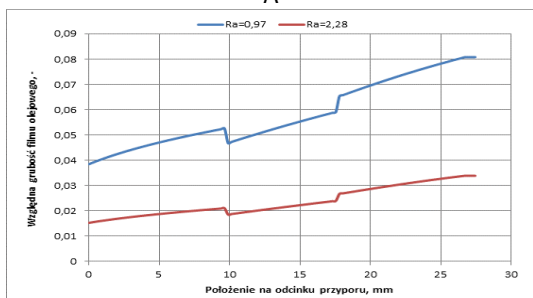
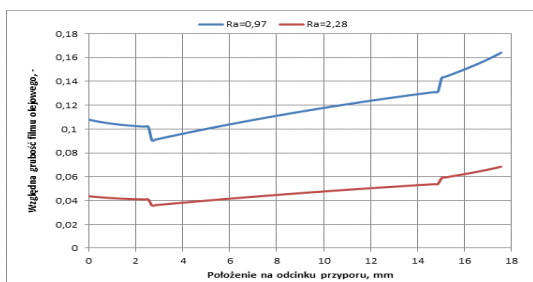
Tab. 7. Podstawowe parametry geometryczne kół zębatych przekładni kątowo-planetarnej o mocy przenoszonej 30 kW stosowanej w lekkich przenośnikach zgrzeblowych.

Rodzaj przekładni:	Kątowo-planetarna	
Stopień przekładni	II (para koło słoneczne – koło satelitarne)	
Metoda wytwarzania kół	III	
Moment wejściowy dla danego stopnia	1061 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla danego stopnia	270 obr/min	
Moduł, mm	m	5
Klasa dokładności	-	6
Chropowatość	Ra	0,21/0,81 μ m

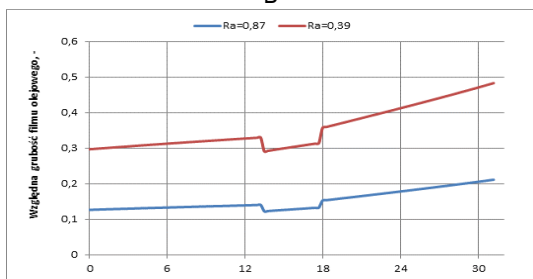
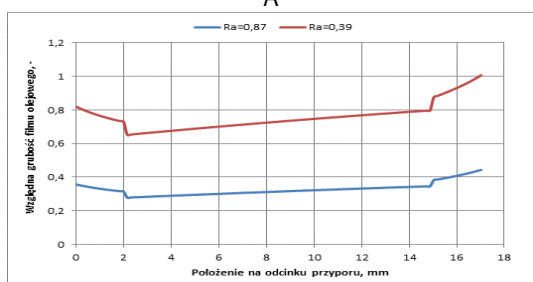
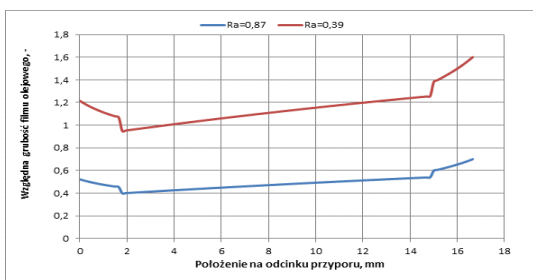
Tab. 8. Podstawowe parametry geometryczne kół zębatych przekładni kątowo-walcowo-planetarnej o mocy przenoszonej 400 kW stosowanej w ścianowych przenośnikach zgrzeblowych.

Rodzaj przekładni:	Kątowo-walcowo-planetarna	
Stopień przekładni	II (walcowa)	
Metoda wytwarzania kół	III	
Moment wejściowy dla danego stopnia	9213 Nm	
Prędkość obrotowa wejściowa dla danego stopnia	414 obr/min	
Moduł, mm	m	7,5
Klasa dokładności	-	6
Chropowatość	Ra	0,21/0,81 μ m

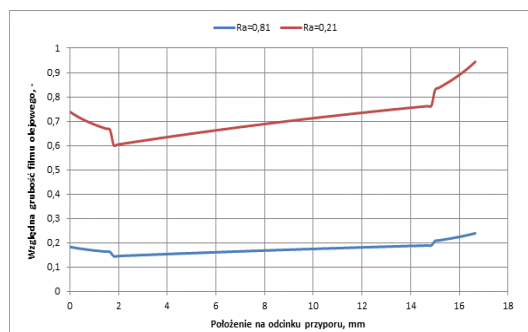
Jedynie w przypadku I stopnia przekładni walcowej (Rys. 13.A), II stopnia przekładni do przenośników zgrzeblowych (Rys. 14 i 16) na pewnym fragmencie odcinka przyporu dochodzi do wystąpienia smarowania mieszanego. Niskie wartości względnej grubości filmu olejowego λ wynikają zasadniczo z relatywnie niskich prędkości obwodowej kół zębatych na II i III stopniu danej przekładni oraz wysokiego obciążenia. W warunkach rzeczywistej eksploatacji wartości chropowatości powierzchni mogą być zdecydowanie inne niż powierzchni kół nowych. Na powierzchni zębów korzystnie, w aspekcie zapewnienia warunków smarowania, będzie oddziaływać proces docierania, niekorzystnie z kolei będą oddziaływać procesy skrawania powierzchni cząstkami twardymi przedostającymi się do oleju przez nieszczelności korpusu oraz procesy zmęczenia powierzchni.



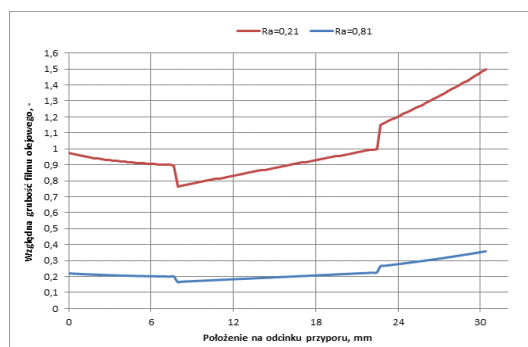
Rys. 13. Przebiegi względnej grubości filmu olejowego λ w funkcji położenia na odcinku przyporu wyznaczone dla przekładni kątowno-walcowej o mocy przenoszonej 22 kW stosowanej w lekkich przenośnikach zgrzeblowych; A – wyniki obliczeń uzyskane dla stopnia II, B – wyniki obliczeń uzyskane dla stopnia III.



Rys. 14. Przebiegi względnej grubości filmu olejowego λ w funkcji położenia na odcinku przyporu wyznaczone dla przekładni walcowej o mocy przenoszonej 132 kW stosowanej w przenośnikach taśmowych; A – wyniki obliczeń uzyskane dla stopnia I, B – wyniki obliczeń uzyskane dla stopnia II, C – wyniki obliczeń uzyskane dla stopnia III.



Rys. 15. Przebiegi względnej grubości filmu olejowego λ w funkcji położenia na odcinku przyporu wyznaczone dla II stopnia przekładni kątowno-planetarnej o mocy przenoszonej 30 kW stosowanej w lekkich przenośnikach zgrzeblowych.



Rys. 16. Przebiegi względnej grubości filmu olejowego λ w funkcji położenia na odcinku przyporu dla II stopnia przekładni kątowno-walcowo-planetarnej o mocy przenoszonej 400 kW stosowanej w ścianowych przenośnikach zgrzeblowych.

5. TECHNOLOGICZNE MOŻLIWOŚCI POPRAWY WARUNKÓW SMAROWANIA UZĘBIĘŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

Biorąc pod uwagę aktualny stan technologii wytwarzania kół zębatych oraz możliwości konstrukcyjne i eksploatacyjne, można wytypować następujące sposoby umożliwiające wzrost względnej grubości filmu olejowego λ :

1. Zastosowanie dwuetapowego szlifowania, zgrubnego i wykańczającego, z zastosowaniem układów wymiany ściernicy (Rys. 17) w trakcie szlifowania (układy takie są stosowane np. w szlifierkach serii TITAN firmy Gleason-Pfauter); w tej metodzie możliwe jest uzyskanie chropowatości powierzchni zębów na poziomie $Ra=0,15 \mu\text{m}$ przy pomiarze wzdłuż zarysu zęba.
2. Zastosowanie polerowania oscylacyjnego (Rys. 18) kształtkami ceramicznymi i pastami polerskimi (tzw. Superfinishing). W wyniku tego procesu również możliwe jest uzyskanie chropowatości powierzchni zębów na poziomie $Ra=0,10 \pm 0,15 \mu\text{m}$ bez względu na kierunek pomiaru.
3. Wprowadzenie po etapie montażu kontrolowanego docierania kół zębatych przekładni na stacji prób (Rys. 19) w sposób umożliwiający dogładzenie powierzchni np. 10 etapów pracy przekładni po ok. 1 godzinie pod obciążeniem stopniowo zwiększającym się od 10% do 100% wartości nominalnej dla każdego kierunku obrotów) wraz z całkowitą wymianą oleju i wyczyszczeniem miski olejowej korpusu przekładni. Proces ten umożliwi jednocześnie dogładzenie powierzchni i poprawę współpracy kół zębatych, zwłaszcza stożkowych.



Rys. 17. Widok zmienarki ściernic szlifierki profilowej typu 1200 TITAN firmy Gleason - Pfauter



Rys. 18. Urządzenie do superfinishingu kół zębatych do średnicy 800 mm.



Rys. 19. Widok przekładni zębatych w trakcie testów na stacji prób.

PODSUMOWANIE

W ramach niniejszej pracy określono, z użyciem zmodyfikowanej metody obliczeniowej opisanej w normie ISO/TR 15144-1:2014 (E), warunki smarowania typowych przekładni zębatych. W szczególności zakres prac badawczych obejmował pomiary chropowatości kół zębatych wytworzonych z użyciem trzech technologii wytwarzania.

Następnym etapem pracy było określenie, z wykorzystaniem wyznaczonych wartości chropowatości R_a , względnej grubości filmu olejowego λ dla 7 par kół zębatych górniczych przekładni zębatych. W obliczeniach wykorzystano parametry geometryczne, technologiczne i obciążeniowe zgodne z rzeczywistymi wartościami.

Szeroki zakres prac doświadczalnych i obliczeniowych pozwolił na określenie szeregu spostrzeżeń, z których najważniejszymi są:

- wyznaczana chropowatość powierzchni zębów kół zębatych zależała od kierunku pomiaru,

- chropowatość mierzona wzdłuż linii zęba była mniejsza niż mierzona wzdłuż kierunku zarysu zęba,
- analizowane przekładnie zębate są eksploatowane w warunkach smarowania granicznego lub mieszanego,
- niekorzystne warunki smarowania analizowanych par kół zębatych tworzących stopnie II lub III przekładni zębatych wynikały z relatywnie niskiej prędkości obrotowej i wysokiej wartości obciążenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdzono, że poprawę warunków smarowania przekładni zębatych, można uzyskać poprzez zastosowanie środków technologicznych umożliwiających zmniejszenie chropowatości powierzchni takich jak szlifowanie dwuetapowe, superfinishing i docieranie wstępne.

BIBLIOGRAFIA

1. Bartz W.J.: Getriebeschmierung. Expert Verlag, Ehningen, 1989.
2. Spalek J.: Problemy inżynierii smarowania maszyn w górnictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
3. Lawrowski Z.: Technika smarowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
4. Kleinlein E.: Einsatz von Wälzlagern bei extremen Betriebs- und Umgebungsbedingungen. Optimierung durch geeignete Konstruktion und Entwicklung von Wälzlagern, Schmierung und Abdichtung. Expert-verlag, 1998.
5. Płaza F., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
6. Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn, Warszawa-Radom 2007.
7. Nadolny K.: Tribologia kół zębatych: zagadnienia trwałości i niezawodności. Wydawnictwo Politechnika Poznańska – ITE, Poznań-Radom 1999.
8. Dowson D., Higginson G.R.: Elastohydrodynamic lubrication. Pergamon Press, Oxford-London 1976.
9. Hamrock B.J., Dowson, D.: Ball Bearing Lubrication. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: 1981.
10. Wiśniewski M.: Elastohydrodynamische Schmierung. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2000.
11. Zwolak J.: Ocena jakości smarowania przekładni zębatych Power Shift wspomaganą komputerowo. Mechanik, 12, 160-169, 2013,
12. Wieczorek A.: Sprawozdanie z pracy NB -183/RG-2/2014, styczeń 2015, Gliwice.
13. ISO/TR 15144-1:2014 (E) Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical gears - Part 1: Introduction and basic principles.
14. Wieczorek A.N.: Designing machinery and equipment in accordance with the principle of sustainable development. Management Systems in Production Engineering No 1(17), s. 28-34, 2015.

Praca została zrealizowana w ramach badań kierunkowych Instytutu Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej BK-277/RG-2/2016 „Analiza wpływu technologii wytwarzania walcowych kół zębatych o uzębieniu zewnętrznym na warunki smarowania górniczych przekładni zębatych”.

Analysis of the impact of selected technologies of treatment of gear wheels with external teeth on the conditions of lubrication of gear transmissions used in drives of transport conveyors

As a part of the study, the lubrication conditions of typical gear transmissions used in drives of conveyors were determined using the modified calculation method described in ISO/TR 15144-1:2014 (E) standard. In particular, the scope of the research work included measurements of roughness of 8 gear wheels produced with the use of three manufacturing technologies. The next stage of work involved determination of the roughness value R_a , the relative thickness of the oil film λ for the gear wheels of the selected gear transmissions. Geometric, process and load parameters corresponding to the real values were used in the calculations. A wide range of the experimental and calculation work performed allowed

making some observations. The most important of them are as follows: the measured value of the roughness of the surface of gear wheel teeth depended on the direction of the measurement; the roughness measured along the flank pitch line was lower than that measured along the tooth profile direction; the gear wheels subjected to the analysis are operated in boundary or mixed lubrication conditions; the unfavourable lubrication conditions of the analysed pairs of gear wheels forming the stage II or III of gear transmissions resulted from a relatively low rotational speed and a high value of the load.

Autor:

dr inż. **Andrzej N. Wieczorek**–Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Górnictwa i Geologii, Instytut Mechanizacji Górnictwa, andrzej.n.wieczorek@polsl.pl.