

Grzegorz WSZELACZYŃSKI\*, Dymitry CAPANIDIS\*,  
Maciej PASZKOWSKI\*

## WPLYW SMAROWANIA NATRYSKOWEGO OTWARTYCH PRZEKŁADNI ZĘBATYCH NA ZUŻYCIE ZĘBÓW I SPRAWNOŚĆ PRZEKŁADNI

### THE INFLUENCE OF SPRAY LUBRICATION OF AN OPEN GEAR TRANSMISSION ON THE TOOTH WEAR AND TRANSMISSION EFFICIENCY

#### Słowa kluczowe:

smarowanie natryskowe centralne, przekładnie zębate, smar, wieniec zębaty, zużycie zębów, zużycie energii elektrycznej

#### Key words:

central spray lubrication, gear transmission, grease, gear rim, tooth wear, electricity consumption

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ rodzaju smarowania na tribologiczne zużywanie i niezawodność eksploatacyjną otwartych przekładni zębatach w układach napędowych młynów kulowych i pieców obrotowych. Przeanalizowano

---

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. I. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska.

wpływ rodzaju smarowania na zużycie energii elektrycznej przy tego typu układach napędowych. Badania i analizy obejmowały wielkogabarytowe przekładnie zębate, wykorzystywane w układach napędowych wymienionych urządzeń, pracujące między innymi w przemyśle: cementowym, chemicznym, górniczym, energetycznym czy celulozowym.

## WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem przemysłu oraz wzrostem wydajności maszyn, rozwiązania konstrukcyjne ich napędów bardzo szybko się zmieniały [L. 1]. W przemyśle ciężkim, do którego można zaliczyć: cementownie, zakłady chemiczne, elektrownie węglowe, kopalnie, huty wykorzystywane są otwarte przekładnie zębate, w których prędkość obwodowa kół zębatach zawiera się w granicach od 1 do 10 m/s. Większość takich przekładni ma zastosowanie przy napędach w piecach obrotowych, młynach kulowych, suszarniach. Urządzenia te najczęściej w układach napędowych mają przekładnię jednostopniową z napędem jedno- lub dwustronnym. Wymiary kół napędzających wynoszą: średnica 500–1000 mm, szerokość 200–1000 mm, natomiast dla kół napędzanych (wieńcowych) są następujące: średnica 2000–5000 mm, szerokość 200–900 mm. Prędkość obrotowa wieńca wynosi 1–35 obr./min. Zdarzają się oczywiście urządzenia o innych parametrach, jednak te przedstawione powyżej można przyjąć jako standardowe.

Ze względu na specyficzną konstrukcję przekładni trudne jest wykonanie obudowy bardzo szczelnej. Wpływ na to mają duże wymiary obudowy oraz duże różnice temperatury urządzenia i otoczenia. Najprostszym sposobem smarowania jest smarowanie zanurzeniowe, czyli zalanie takiej przekładni olejem o dużej lepkości [L. 2], o VG 1000–2000 cSt [L. 3]. Takie rozwiązanie było powszechnie stosowane od lat 20. do lat 90. w Polsce i na świecie. Smarowanie tego typu miało dużo wad, do których należy zaliczyć:

- permanentne wycieki oleju na zewnątrz urządzenia i przedostawaniem się węglowodorów do gleby (względy ekologiczne), a także osłabianie konstrukcji nośnej urządzenia (ryzyko jej uszkodzenia poprzez nasiąkanie żelbetonu olejami i ich pochodnych);
- niska skuteczność smarowania. Oleje o wysokiej lepkości posiadają niski współczynnik lepkości, co wynika z tego, że średnia temperatura na wieńcu i kole napędowym wynosi zimą: 40–50°C, a latem 50–80°C. Taka temperatura powoduje obniżenie lepkości oleju nawet wielokrotnie od podanej w normie [L. 3] dla 40°C jako temperatury odniesienia do określenia lepkości olejów przemysłowych. Problem ten występuje głównie w przypadku pieców obrotowych. W młynach w systemach zanurzeniowych stosuje się podgrzewanie oleju, aby osiągnął lepkość pozwalającą na rozprowadzenie go po powierzchni kół zębatach;

- wpływ czynników chemicznych na powierzchnie zębów kół zębatych. Olej, pracując w warunkach otwartej przekładni, jest narażony na wpływ środowiska. Powietrze panujące przy pracy takich urządzeń jest zanieczyszczone stałymi cząsteczkami (pyły: żużla, gipsu, węgla), ale również związki azotu i siarki. Powoduje to degradację składu chemicznego oleju, a w konsekwencji procesy starzenia oleju – wzrost kwasowości oleju. To z kolei powoduje, że olej z czynnika chroniącego przed korozją może, w skrajnych przypadkach, powodować korozję międzykrystaliczną stali.

W latach 90. w Polsce zaczęto zmieniać technologię smarowania otwartych przekładni zębatych. Ze smarowania zanurzeniowego zaczęto wprowadzać smarowanie smarami plastycznymi. Dlaczego smary plastyczne? Odpowiedź teraz wydaje się prosta. Olej pod wpływem siły odśrodkowej w obracających się kołach zębatych był szybko usuwany z powierzchni zębów. Zastosowanie smarów plastycznych likwidowało ten problem. Wprowadzono nowe rodzaje smarów o dobrych właściwościach adhezyjnych [L. 1, 4]. To duża adhezja smarów spowodowała znaczny postęp w zmianie rodzaju smarowania z zanurzeniowego na smarowanie smarami plastycznymi. Liczne próby z użyciem smarów plastycznych spowodowały, że optymalnym sposobem nanoszenia smarów na powierzchnie zębów jest natrysk z użyciem sprężonego powietrza [L. 1, 5], czyli nanoszenie małych cząstek smaru na powierzchnie współpracujących zębów.

Smarowanie natryskowe smarem plastycznym polega na rozpyleniu smaru za pomocą dyszy natryskowej, do której oddzielnie doprowadza się smar plastyczny, a oddzielnie sprężone powietrze. Dysze zasilające pozwalają na bezkontaktowe nanoszenie środka smarnego. Zaletą takiego smarowania jest m.in. lepsze rozprowadzenie smaru na smarowanych powierzchniach oraz efekt chłodzący, tym większy, im większe będzie ciśnienie powietrza transportującego smar. Ten typ smarowania jest bardzo skuteczny i ekonomiczny. Smarowanie natryskowe smarami plastycznymi znajduje zastosowanie w takich urządzeniach, jak np.: wolnobieżne koła zębate, przekładnie łańcuchowe lub obrzeża kół pojazdów szynowych [L. 6]. W przypadku smarowania otwartych przekładni zębatych z zastosowaniem smarowania natryskowego wymagane jest zastosowanie smarów plastycznych charakteryzujących się dużą adhezją do smarowanych powierzchni. Wynika to głównie z braku wystarczającego uszczelnienia, jak również, w większości przypadków, dużego zapylenia [L. 7, 8]. Czynniki te mają duży wpływ na zużywanie tribologiczne współpracujących powierzchni zębów. Poprzez zastosowanie smarów specjalnych o dużej przyczepności, na współpracujących powierzchniach zębów tworzy się warstewka smaru. W miejscach, gdzie prędkość poślizgu między dwoma zębami jest największa, powstaje film smarny, rozdzielający powierzchnie zębów, a w tych miejscach gdzie prędkość dąży do zera, powierzchnie zębów musi rozdzielać warstewka smaru, a w szczególności zastosowane w smarze plastycznym dodatki stałe (np. grafit, dwusiarczek molibdenu).

## OBIEKT BADAŃ

Badania prowadzono na pracujących w polskich cementowniach młynach kulowych i piecach obrotowych. Badano jeden młyn pracujący z użyciem systemu smarowania zanurzeniowego. Użyty olej mineralny o VG 1000 cSt [L. 9, 10], z domieszką smaru wapniowego typu KZ około 20–25%. Piec obrotowy i dwa młyny kulowe są od ponad 10 lat smarowane natryskowo (smar–powietrze) z użyciem palety natryskowej typu ATS/WOE/SBD-B/2. Dawki smaru podawane przez producentów [L. 1, 4, 5, 11, 12] to około 1,5 grama smaru na 1 cm szerokości zęba w kole napędowym na jedną godzinę pracy. W badaniach porównywano stan zębów na wieńcu w piecu i suszarni w zależności do rodzaju użytych systemów smarowania. Obliczono, jakie mogą wystąpić oszczędności w zużyciu energii elektrycznej przy zastosowaniu różnych systemów smarowania.

## WYNIKI BADAŃ

Na **Rys. 1** przedstawiono fragment wieńca zdemontowanego z młyna kulowego. Okres pracy wynosił około 25–30 lat. Zastosowany był system smarowania zanurzeniowego. Czynnikiem smarującym był olej mineralny VG1000 cSt i smar półpłynny NLGI 000 serii KZ. Średnica wieńca wynosiła 4300 mm, a szerokość około 350 mm.



**Rys. 1.** Fragment wieńca koła zębatego z układu napędowego młyna kulowego po okresie eksploatacji

Fig. 1. Excerpt ring gear drive system of ball mill after operation

Na powierzchniach roboczych (bokach) zębów widoczne są odkształcenia plastyczne z licznymi wżerami oraz śladami korozji międzykrystalicznej. Do smarowania natryskowego użyto agregatu natryskowego typu: ATS/WOE/SBD-B/2, który przedstawiono na **Rys. 2**.

Wydajność agregatu określała wielkość dawki wynoszącej  $2 \times 2 \text{ cm}^3$ , gdzie czas cyklu smarowania wynosił około 2 minuty. Stosowanym środkiem smarowym był smar o NLGI 00-000, baza: olej mineralny o lepkości wg VG 2500 cSt

z dodatkiem grafitu do około 10%. Zalecana dawka smaru  $D$  wynosi: 1,5 grama na  $B = 1$  cm szerokości koła zębatego na  $t = 1$  h, co można zapisać jako:

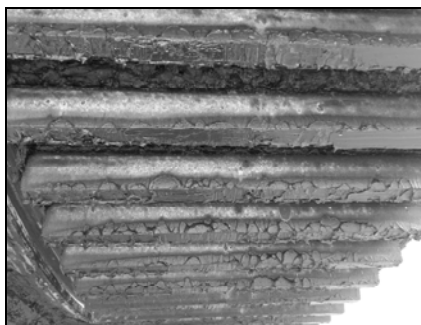
$$D = 1,5 \times B \times t \quad (1)$$



**Rys. 2. Agregat natryskowy typu: ATS/WOE/SBD-B/2**

Fig. 2. Spraying aggregate type: ATS/WOE/SBD-B/2

Badane przekładnie zębate w układach napędowych młyna kulowego (**Rys. 3**) posiadały koła zębate napędowe o zębach prostych, których szerokość miała 600 mm, a prędkość obrotowa wynosiła około 30–40 obr./min.



**Rys. 3. Fragment wieńca koła zębatego z układu napędowego młyna kulowego**

Fig. 3. Detail of the ring gear to the drive ball mill

Zużycie smaru wg wzoru (1) będzie wynosiło  $60 \times 1,5 = 90$  g/godz. W układzie napędowym pieca obrotowego (**Rys. 4**), napędowe koło zębate o zębach prostych miało szerokość 400 mm, a prędkość obrotowa wynosiła około 20–30 obr./min. W tym przypadku zużycie smaru wg (1) wynosi:

$40 \times 1,5 = 60$  g/godz. W obu omawianych przypadkach średnice wieńców kół napędzanych były w granicach 4000 mm.



**Rys. 4. Kola zębate w układzie napędowym pieca obrotowego**

Fig. 4. Cogwheels in the drive system of the rotary kiln

Przedstawione dwa rodzaje smarowania otwartych przekładni zębatach o zębach prostych badano i prowadzono obserwacje na przestrzeni lat 2000–2015. W przekładni ze smarowaniem w systemie zanurzeniowym obserwowano wyraźne odkształcenia plastyczne powierzchni boków zębów. Odkształcenia te nie miały większego wpływu na pracę przekładni, jednak generowały zwiększony hałas spowodowany zwiększonymi luzami międzyzębnymi, jak też występowało ryzyko uszkodzenia przekładni na skutek wyłamania zębów koła zębatego. Oprócz aspektu mechanicznego należy także uwzględnić aspekt energetyczny i ekologiczny takiego systemu smarowania. Precyzując to zagadnienie należy podkreślić, że smarowanie zanurzeniowe takich przekładni zębatach jest szkodliwe dla środowiska. Przy dużych wymiarach przekładni i różnicy temperatur jest niemożliwe skuteczne uszczelnienie przekładni. Efektem tego jest ciągle przedostawanie się oleju na zewnątrz przekładni. Po kilkunastu latach eksploatacji wydostająca się na zewnątrz przekładni ilość oleju może być liczona w tonach. Tak duża dawka oleju, która wydostaje się na zewnątrz przekładni, prowadzi do osłabienia ustroju nośnego (wykonanego z żelbetonu) układu napędowego i w konsekwencji przenikanie węglowodorów do gleby. Taki proces jest bardzo niekorzystny dla środowiska naturalnego, ale również osłabia grunt, na którym zamontowane są przekładnie i inne urządzenia, a zatem istnieje wysokie ryzyko osłabienia i uszkodzenia urządzenia.

Poza czynnikiem ekologicznym zanotowano i obliczono, jak smarowanie tego typu wpływa na bilans energetyczny takiego urządzenia. Jak wiadomo, oleje o dużej lepkości w niskich temperaturach szybko ulegają procesowi krzepnięcia. Olej już w temperaturze  $10^{\circ}\text{C}$  przechodzi z fazy ciekłej do stałej. Prowadzi to do tego, że przekładnia pozbawiona jest smarowania współpracują-

cych ze sobą zębów. Aby uniknąć takiej sytuacji, należy olej podgrzewać do temp 30–40°C. Taka temperatura pozwala na samoczynne rozprowadzanie oleju w przekładni i zapewnienie względnego smarowania. W celu zapewnienia płynności oleju w ilości około 200–300 l, taka ilość znajduje się w obudowie przekładni, należy dostarczyć energię w ilości około 12–15 MWh rocznie. W kalkulacji przyjęto 95 dni pracy układu napędowego, po 24 h na dzień i moc grzewczą 5–6 kW.

W wyniku badań zaobserwowano, że olej ulega procesowi starzenia. W oleju zachodzą procesy, które powodują wzrost jego kwasowości, a to z kolei wpływa na oddziaływanie takiego oleju na powierzchnię współpracujących zębów. Związki kwasowe wydzielane w oleju powodują występowanie na powierzchniach trących korozji powierzchniowej z możliwością wystąpienia korozji międzykrystalicznej (powodują to związki siarki wydzielające się w oleju). Zjawisku temu można zapobiec, stosując częstsze wymiany oleju, ale takie działania generują znaczne koszty finansowe, a także nie jest to korzystne z ekologicznego punktu widzenia (wzrost zużycia oleju).

Obserwując powierzchnie zębów smarowanych metodą zanurzeniową, stwierdzono:

- powierzchnia zębów charakteryzuje się dużą chropowatością z widoczną korozją międzykrystaliczną,
- widoczne są znaczne odkształcenia plastyczne powierzchni zębów,
- stałe wyciekanie oleju poza obudowę przekładni i przesiąkanie tego oleju do fundamentu ustroju nośnego przekładni i do gruntu,
- duże zużycie energii elektrycznej na podgrzanie oleju,
- utrudniony rozruch przekładni z niebezpieczeństwem wystąpienia pracy „na sucho”,
- występuje zmniejszona trwałość przekładni.

Badania wykazały, że smarowanie natryskowe smarem plastycznym o NLGI 0-000 z dodatkiem grafitu, przy zastosowaniu agregatu typu: ATS/WOE/SBD-B/2, powoduje następujące efekty:

- powierzchnia zębów była bardzo gładka, tzn. charakteryzowała się niską wartością chropowatości,
- nie jest konieczne podgrzewanie smaru w celu zapewnienia jego właściwości smarujących; stosowane smary mogą pracować w zakresie temperatur od –15°C do +40°C,
- nie zaobserwowano korozji elementów przekładni, jak również widocznych wżerów materiału,
- nie występuje praca na sucho przekładni podczas rozruchu, gdyż natryskowe podawanie smaru odbywa się przed uruchomieniem układu napędowego,
- odkształcenia plastyczne powierzchni zębów były małe lub nie występowały.

## PODSUMOWANIE

Smarowanie natryskowe smarem plastycznym z dodatkiem grafitu jest bardziej efektywne w porównaniu ze smarowaniem zanurzeniowym przekładni zębatych. Smarowanie natryskowe obniża wartość współczynnika tarcia toczo-ślizgowego między współpracującymi zębami, co prowadzi do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w przedziale 1–3% (określonego na podstawie rzeczywistego zużycia energii u użytkowników), a także wydłuża bezawaryjną pracę przekładni. Zużycie energii elektrycznej obliczano tylko w oparciu o zapotrzebowanie danego systemu smarowania w okresach zimowych.

W wyniku prowadzonych badań zaobserwowano odkładanie się smaru w mikronierównościach na powierzchni zębów i wypełnianie porów na tych powierzchniach smarem z grafitem. Ze względu na ciężkie warunki pracy można założyć, że podczas pracy na powierzchni zębów występują duże naciski skoncentrowane. W skrajnych przypadkach może to prowadzić do przenikania cząsteczek węgla do wierzchniej warstwy staliwa, z którego są wykonane koła zębate, a to z kolei prowadzi do zmian struktury staliwa i zmiany twardości powierzchni współpracujących ze sobą powierzchni zębów. Proces ten należałoby dokładniej zbadać i wyjaśnić, jak grafit zawarty w smarze oddziałuje na zmiany własności i staliwa. Kierunki dalszych prac badawczych powinny także obejmować dokładny bilans energetyczny przedstawionych układów napędowych. Przedstawiona problematyka jest stosunkowo złożona i jeszcze nie w pełni rozpoznana. Dopiero otwiera dyskusję nad procesami zachodzącymi w prezentowanych przekładniach zębatych i wymaga dalszych badań i analiz naukowych.

## LITERATURA

1. Czarny R., Smary plastyczne, WNT, Warszawa 2004.
2. Moeller Uwe J., Udo Boor Udo, Schmierstoffe im Betrieb, VDI-Verlag GmbH (Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure-Düsseldorf, 1986.
3. DIN Taschenbuch 192 Schmierstoffe (zbiór norm), Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1992.
4. Przemysłowe Środki Smarne, Poradnik Total (praca zbiorowa), Warszawa 2003.
5. Eugen Woerner Zentralschmieranlage, Informator nt. smarowania otwartych przekładni zębatych, 2007.
6. Czarny R. (red.), Systemy centralnego smarowania maszyn i urządzeń. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
7. Czarny R. (red.), Smarowanie układów jezdnych maszyn roboczych i pojazdów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
8. Lawrowski Z., Technika smarowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
9. Klamann D., Schierstoffe und Verwandte Produkte, Verlag Chemie 1982.
10. Messo, Lubricants and Specialies Imperial Oil, Edycja IX, January 1996.



11. Lubricants Related Specialties Exxon/Esso Basic Line, Marketing Technical Services, Products Research Division, EXXON Research and Engineering Company, Edycja XII, 01.04.1988.
12. Schmierstoffe Was ich schon immer darueben wissen wollte Teil1 i Teil 2, ESSO A.G., Hamburg 1985.

## Summary

The article covers the issues of the influence of the type of lubrication on the tribological wear and operational reliability of open gears in the propulsion system of ball mills and rotary kilns. The influence of the type of lubrication on electricity consumption for these types of drive systems was analysed. The research and analysis included the large-size gear transmissions used in the drive systems of these devices, working among others in the following industries: cement, chemical, mining, energy, or cellulose.

It has been found that the plastic grease spray lubrication with addition of graphite is more effective compared to the dip lubrication of gear transmissions. Spray lubrication reduces the friction coefficient of rolling-sliding between mating teeth, which leads to a reduction in electricity consumption in the range of 1–3%, and it also extends trouble-free transmission operation.

The depositions of the grease in the micro-irregularities on the surface of the tooth and the filling of the pores on the surfaces by the grease with graphite were beneficial. Due to the very heavy operating conditions of the transmissions, the high concentrated pressures occurred on the surface of the tooth. This can lead to the penetration of carbon particles into the surface layer of the steel from which the gear wheels are made, and this leads to changes in the structure of the steel and in the hardness of working with each tooth surface.