

Franciszek W. PRZYSTUPA*, Piotr SOKOLSKI*

PRZYCZYNA PRZYSPIESZONEJ DEGRADACJI PRZEKŁADNI ŚRUBOWEJ TOCZNEJ

THE CAUSE OF AN ACCELERATED DEGRADATION OF A BALL SCREW

Słowa kluczowe:

diagnozowanie, zużycie, przegrzanie, elementy toczne

Key words:

diagnosing, wear, overheating, rolling elements

Streszczenie

W pracy przedstawiono studium przypadku uszkodzenia węzła przekładni śrubowej tocznej pracującej w małogabarytowej maszynie roboczej. Skutkiem utraty przez ten mechanizm właściwości umożliwiających poprawną pracę była poważna awaria całego obiektu. W celu określenia przyczyn wystąpienia uszkodzenia zrealizowano szczegółowe badania materiałowe oraz podjęto próbę odtworzenia charakteru przebiegu pracy podzespołu.

W wyniku przeprowadzonych analiz struktury materiałowej oraz rozkładu twardości na przekroju elementów tocznych zidentyfikowano przegrzanie przekładni jako przyczynę zaistniałego uszkodzenia. Było ono wynikiem błędnego oszacowania intensywności zjawisk cieplnych w przekładni.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, ul. I. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław.

WPROWADZENIE

W wysokiej jakości przekładniach śrubowych toczyń stosowany jest czasami wewnętrzny obieg kulek, w którym elementy te po przetoczeniu przez zwoje gwintu nakrętki zawracane są na początek obiegu przez kanał w specjalnej wkładce osadzonej w nakrętce. W celu zapewnienia niezawodnej pracy tych urządzeń konieczne jest spełnienie szeregu wymagań z zakresu eksploatacji. Najważniejsze z nich to:

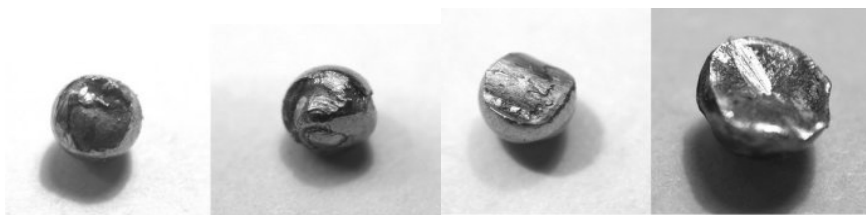
- brak uszkodzeń bieżni i elementów toczyń, brak produktów zużycia na bieżni;
- dokładny montaż;
- smarowanie olejami przeciwiernymi, w mgle lub bezpośrednio;
- wielkość minimalnego i maksymalnego zacisku wstępnego;
- poziom temperatury pracy.

Niespełnienie tych wymagań prowadzi do powstawania uszkodzeń, które można zaklasyfikować do trzech podstawowych grup: nierównomiernej pracy, zbyt dużej wartości luzu, pęknięcia.

Najczęściej obserwowanymi przyczynami zawodnej pracy tych elementów są: błędne określenie działających obciążeń oraz brak zapewnienia eksploatacji w odpowiednich warunkach smarnych węzłów ciernych. Bezpośrednim skutkiem tych błędów jest zakłócenie bilansu termicznego w przekładni. Przyczynia się to m.in. do złuszczenia przypowierzchniowych warstw elementów toczyń oraz bieżni [L. 2, 3].

GENEZA PROBLEMU

Podczas eksploatacji maszyny roboczej małej mocy doszło do poważnej awarii. Ustalono, że przyczyną było pogorszenie się stanu technicznego przekładni śrubowej toczyń, stanowiącej podstawową część układu napędowego tego obiektu. Wstępna analiza pozwoliła określić, że uszkodzenie to spowodowane było degradacją elementów toczyń (**Rys. 1**).



Rys. 1. Zaawansowana degradacja elementów toczyń uszkodzonej przekładni

Fig. 1. The advanced degradation of the rolling elements in the damaged ball screw

Celem pracy było określenie pierwotnej przyczyny wystąpienia awarii. Rozważono 3 źródła tego uszkodzenia: materiałowe, eksploatacyjne oraz projektowe. W tym celu przeprowadzono szereg analiz zogniskowanych na badanie struktur i właściwości zdegradowanych elementów.

BADANIA ZDEGRADOWANYCH ELEMENTÓW

Materiał, z jakiego wykonane zostały elementy toczne, to stal nadeutektoidalna ŁH15. Struktura tej stali powinna być skrytoiglasta, czyli w przekroju drobnoziarnista – z drobnymi wtrąceniami węglików żelaza i chromu [L. 4].

W wyniku przeprowadzonych obserwacji stwierdzono następujące nieprawidłowości rzeczywistej struktury uszkodzonych kulek:

- zmiany materiałowe struktury na przekroju, odzwierciedlane np. zmianą twardości i niejednorodnością ziaren. Mogą one świadczyć o eksploatacyjnej zmianie właściwości;
- gruboziarnista struktura materiału kulek o niewłaściwej twardości jest niekorzystnym wskaźnikiem materiałowym. Efektem jej wystąpienia jest niepoprawność działania przekładni.

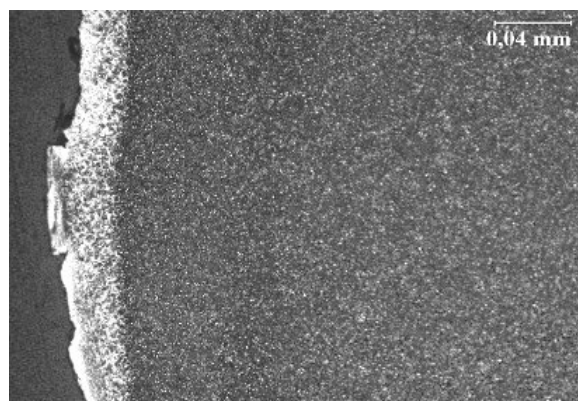
Przeprowadzono badania struktury materiałów oraz ich twardości. Przygotowanie kulek do obserwacji metalograficznej i twardościowej obejmowało:

- wykonanie cylindrycznych form analitycznych;
- zatopienie kulek w specjalnym materiale stabilizującym;
- wstępne przecięcie zatopionych próbek w pobliżu średnic;
- szlifowanie powierzchni do jakości pomiarowej (3-stopniowe).

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań stwierdzono obecność w rdzeniu kulek martenzytu skrytoiglastego z węglnikami żelaza i chromu, właściwymi dla wykorzystywanej stali ŁH15. Jednak w warstwie wierzchniej tych elementów zaobserwowano skutki przegrzania powyżej temperatury hartowania (840°C). Przy atestowanej jakości kulek – z martenzytem iglastym na wskroś – takie przegrzanie może być tylko wynikiem eksploatacji. Zazwyczaj takie zmiany zachodzą przy ekspozycji na działania termiczne, które są efektem pracy w niewłaściwych warunkach.

Na zglądach stwierdzono ponadto obecność amorficznych przetopień innych metali (**Rys. 2**). Na tej podstawie wnioskowano o wystąpieniu przegrzania i ponownego zaistnienia procesu hartowania elementów tocznych [L. 1]. W takim stanie mogło dojść do ich uplastycznienia i deformacji w strefie powierzchniowej. Istotną w tej sytuacji kwestią było określenie dopuszczalnej temperatury roboczej przekładni. Fabrycznie podana wartość tej temperatury to ok. 65°C, przy ok. 80°C na powierzchni. Wynikowa różnica do temperatury powyżej temperatury hartowania jest zatem znaczna.

W oparciu o powyższe wnioski stwierdzono, że przyczyną uszkodzenia było przegrzanie przekładni.



Rys. 2. Przepowierzchniowa struktura materiału kulki, widoczne: martenzyt skrytoiglasty z węglkami żelaza i chromu, strefa przegrzania oraz przetopienia metaliczne

Fig. 2. The surfacelayer of a ball. Noticeable: Acicular martensite with iron carbide and chromium carbide, overheating zone and interfusions

W przypadku uszkodzeń tu rozpatrywanych nie istnieje problem trwałości, gdyż powstałe uszkodzenia są typu doraźnego.

Nakrętka, podobnie jak i śruba powinny wykazywać twardość ok. 58–62 HRC (przy nawęglaniu lub hartowaniu indukcyjnym). Uszkodzenia kulek wynikać mogły również z wad materiału struktury nakrętki przekładni.

Wydzielenie jednej przyczyny uszkodzenia tego złożonego zespołu wymaga wykluczania procesów mniej prawdopodobnych i wskazywania procesów o większym prawdopodobieństwie.

Zaobserwowano zjawisko synergii – nakładania się kilku procesów na końcowy efekt degradacyjny.

Dla potwierdzenia jednoznacznych wyników analiz metalograficznych przeprowadzono badania twardości na przekrojach kulek.

Zbadano 25 kulek o różnym poziomie degradacji:

- o niewielkim poziomie degradacji – 4 szt.;
- o umiarkowanym poziomie degradacji – 15 szt.;
- o znacznym poziomie degradacji – 6 szt.

Jednocześnie dokonano analizy kilkudziesięciu innych kulek pod kątem zewnętrznego obrazu degradacji – zużycia, uszkodzeń, zniszczenia.

POMIARY TWARDOŚCI

Pomiary twardości wykonano na mikrotwardościomierzu firmy LECO typu M-400A, metodą Vickersa, przy obciążeniu wgłębnika 0,98 N. Wykonano ok. 120 pomiarów twardości.

Sprawdzenie na wzorcu twardości HV 0,3 = 690 MPa dało odczyt HV 0,3 = 693 MPa, natomiast HV 0,1 = 743 MPa na tym samym wzorcu.

Zmierzone twardości kulek zawierały się między HV 0,1 = 767 – 1080 MPa. Uwzględniając poprawkę (-53 MPa), twardość kulek można określić jako:

$$\text{HV } 0,1 = 714 - 1027 \text{ MPa.}$$

Przeliczenie za pomocą właściwej metody (tabeli) na jednostki HRC da wartości:

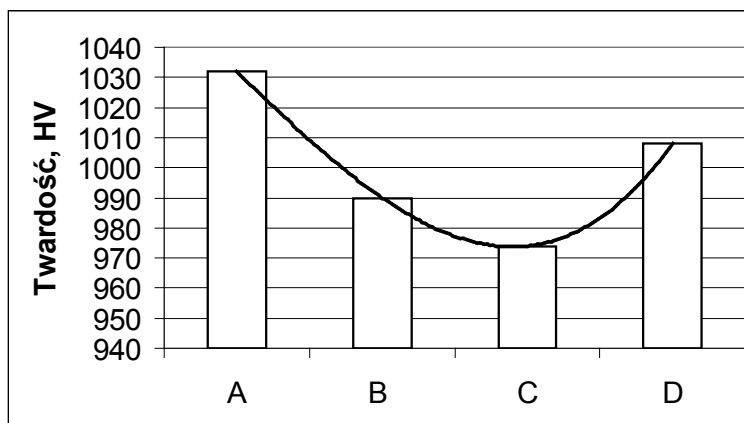
$$\text{HRC } 60-68.$$

Przy czym twardości większe pojawiały się na powierzchni kulek.

Największe różnice dla wszystkich kulek (wskazanie max. i min.) to określone jako graniczne – HV 0,1 = 714 – 1027, zaś dla pojedynczej kulki jest podobnie, czyli różnica twardości wynosiła ok. 8 HRC.

Atestowany niejednorodny materiał nie mógł powstać przy przekazaniu do eksploatacji (zbyt mała średnica kulek!), mógł zmienić swe właściwości jedynie w trakcie eksploatacji.

Wyniki rozkładu średniej twardości w przekroju kulek przedstawiono na **Rys. 3**. Stwierdzono wzrost twardości wraz z odległością od rdzenia. Dodatkowo, należy podkreślić różnice twardości dla punktów jednakowo odległych od warstwy wierzchniej. Charakter tego rozkładu był różny dla poszczególnych elementów tocznych, co było wynikiem nierównomiernego postępu degradacji kulek.



Rys. 3. Rozkład średniej twardości w przekroju elementów tocznych (A i D – punkty w warstwie wierzchniej, B i C – punkty w rdzeniu)

Fig. 3. The distribution of the average hardness in a cross section of rolling elements (A, D – points in the surface layer; B, C – points in the core)

PODSUMOWANIE

Przyczyną uszkodzenia badanej przekładni śrubowej tocznej było jej przegrzanie. Identyfikacja tego procesu była możliwa na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań: struktury oraz twardości zdegradowanych elementów tocznych. Skrajnie niekorzystne warunki, w jakich eksploatowana była przekładnia, doprowadziły do zmiany oryginalnej struktury jej elementów.

Kluczowym problemem, decydującym o uszkodzeniu przekładni, było przegrzanie mechanizmu. Wystąpienie tego zjawiska było wynikiem błędów popełnionych na etapie konstruowania, m.in. niedokładnie oszacowano intensyfikację zjawisk ciernych w obrębie tego węzła. Aby w zakresie działań eksploatacyjnych zapobiec przyspieszonemu zużyciu, można dokonać implementacji prostego systemu diagnostycznego do mechanizmu, np. monitoringu temperatury przekładni. Realizacja tego postępowania możliwa jest w oparciu o zastosowanie mierników temperatury. Istotną modyfikacją systemu eksploatacji byłoby również użycie wyłączników z wcześniej zadaną temperaturą krytyczną, wyznaczoną przez graniczne warunki poprawnej pracy przekładni. Rozwiązanie to jest zarówno doraźną metodą użytkownika błędnie skonstruowanego mechanizmu napędowego, jak również zwiększa poziom bezpieczeństwa pracy poprawnego strukturalnie obiektu.

LITERATURA

1. Ciszewski A. i in.: Materiały konstrukcyjne w budowie maszyn. PWN, Warszawa 1989.
2. Lawrowski Z.: Tribologia, PWN, Warszawa 1993.
3. Przystupa F.W.: Diagnostyka stanów przedawaryjnych w MRC., Problemy Maszyn Roboczych z. 30/2007, s. 25–34.
4. Przystupa F.W., Sipa J.: Przekładnie śrubowe toczne w mechanizmach maszyn roboczych, Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 5/2010, s. 27–31.

Summary

The paper presents a case study of a failure of a ball screw, operating in a small working machine. The result of the decrease of its operational properties was a major break-down of the entire structure. In order to determine the causes of the failure, detailed material tests were carried out. The attempt to reconstruct the character of the course of the work of this component was done as well.

The analyses of material structure and hardness distribution in the cross-section of the rolling elements enabled an identification of the occurred failure. The cause was an overheating of the transmission. It was the result of an underestimation of the intensity of thermal effects in the mechanism.