

Metrological problems during mounting of bearings in machines

Problemy metrologiczne podczas montażu łożysk w maszynach

STANISŁAW ADAMCZAK
MAREK GAJUR
KRZYSZTOF KUŹMICKI *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.11.23>

The article is devoted to metrological problems occurring during the assembly of bearings in machines. Typical errors made during measurements of the components of bearing nodes and their influence on the bearing life are listed. Design solutions in the form of composite bearing hubs have been described, which allow to solve of key metrological problems and avoid mistakes made during the assembly of car chassis systems.

KEYWORDS: rolling bearings, assembly, assembly errors, play, bearing hub

Artykuł poświęcono problemom metrologicznym występującym podczas montażu łożysk w maszynach. Wymieniono typowe błędy popełniane podczas pomiarów elementów składowych węzłów łożyskowych i ich wpływ na trwałość łożysk. Opisano rozwiązania konstrukcyjne w postaci zespolonych piast łożyskowych pozwalające rozwiązać kluczowe problemy metrologiczne i uniknąć błędów popełnianych podczas montażu układów jezdnych samochodów.

SŁOWA KLUCZOWE: łożyska toczne, montaż, błędy montażu, luz, piasta łożyskowa

Wprowadzenie

W ramach procesów ciągłego doskonalenia ludzie analizują miejsca powstawania błędów i szukają rozwiązań na ich ograniczanie lub eliminację. Ma to duże znaczenie dla zmniejszania wydatku energetycznego i emisji CO₂, co jest niezmiernie ważne w perspektywie idei zrównoważonego rozwoju. Jednym z problemów do rozwiązania jest zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia błędów montażu łożysk tocznych w różnych aplikacjach. Ich sprawność działania i trwałość jest uzależniona od prawidłowego doboru, montażu i eksploatacji [1]. Błędy popełniane w tych trzech obszarach przyczyniają się do strat finansowych producentów łożysk tocznych, producentów wyrobów finalnych i wreszcie niezadowolonia klienta końcowego, który na dodatek musi zapłacić za wszystkie błędy producentów i własne.

Pomimo że łożyska toczne charakteryzują się dużą niezawodnością, to na około 10 mld sztuk produkowanych rocznie około 0,5% ulega uszkodzeniu lub awarii w trakcie eksploatacji [2]. Przyczyny tego są różne. Większość jest następstwem błędów popełnianych

w wyniku niewiedzy oraz nieprawidłowo opracowanych instrukcji montażowych i eksploatacyjnych. Równie istotne są błędy wyboru metod pomiarowych, wyposażenia pomiarowego i samych pomiarów oraz nieprzeprowadzanie analizy zdolności systemów pomiarowych [3–5]. Oddzielną grupę błędów stanowi niewłaściwy dobór łożysk, których cechy konstrukcyjne nie odpowiadają warunkom pracy.

Dobrze przeprowadzony montaż łożysk wymaga doświadczenia, staranności, czystości, dokładności, wyboru właściwej metody montażu oraz użycia odpowiednich środków pomiarowych. Przystępując do montażu, należy się zapoznać z instrukcją określającą kolejność czynności montażowych, zalecany smar i jego ilość oraz wymagane narzędzia. Należy przy tym zwrócić uwagę na czystość i stan łożysk. Powinny być one przechowywane w stabilnej temperaturze i wilgotności powietrza. Nie mogą być narażone na wibracje i powinny być zapakowane w oryginalne, nieuszkodzone opakowania, na których musi widnieć data ważności zabezpieczenia antykorozyjnego [2].

Problemy metrologiczne i ich przełożenie na błąd montażu łożysk w maszynach

Zagadnienie prawidłowego montażu łożysk w maszynach opiera się w głównej mierze na właściwym wyznaczeniu wymiarów części współpracujących z nimi. Do najważniejszych czynników należą: średnice obudów i wałów, niewspółosiowe otwory obudowy, brak płaskości powierzchni montażowych, kąty ugięcia wałów i wymiary liniowe ogniwi łańcuchów wymiarowych, mających wpływ na luz wzdłużny i poprzeczny. Przy pomiarach średnicy obudowy często popełnia się błędy związane z wykonaniem jednego pomiaru w jednym przekroju prostopadłym do osi. Zapomina się o występowaniu błędów kształtu, takich jak okrągłość czy walcowość, które mogą doprowadzić do powstania nadmiernego luzu lub wręcz do jego skasowania.

Wykonanie tych pomiarów w warunkach montażu produkcyjnego jest możliwe, ale wymaga dodatkowego wyposażenia. Natomiast w warunkach większości warsztatów naprawczych służb serwisowych nie jest to możliwe. Nie dysponują one stosownymi środkami

* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak – adamczak@tu.kielce.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7797-6330> – Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska
Mgr inż. Marek Gajur – mgajur@flt.krasnik.pl, <https://orcid.org/0000-0001-7760-8784> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska
Mgr inż. Krzysztof Kuźmicki – kkuzmicki@flt.krasnik.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8118-6593> – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska

pomiarowymi, a kojarzenie części odbywa się na zasadzie każdy z każdym.

Problemy metrologiczne występują również w przypadku pomiarów błędu współosiowości i prostolinowości wału, które w warunkach wielkoseryjnego montażu nie są wykonywane. Niewłaściwy rozkład sił działających na elementy toczne i pierścienie powoduje, że występują strefy nadmiernego obciążenia, a elementy toczne toczą się po obrzeżach bieżni.

Analizując montaż skrzyń biegów, silników elektrycznych i układów jezdnych u wielu producentów, można stwierdzić, że wykonują oni pomiary elementów składowych zespołów na etapie kontroli dostaw, poprzez losowo pobraną próbkę, natomiast na etapie montażu dokonują kontroli, np. sił niezbędnych do wmontowania łożyska na wał czy w obudowę. Przekroczenie siły poza pole tolerancji jest sygnałem nieprawidłowości i powoduje skierowanie zespołu do weryfikacji przyczyn odchylenia.

Innym przykładem pomiarów potwierdzających prawidłowość montażu łożysk w zespole są pomiary temperatury i momentu obrotowego. Tutaj występują problemy związane z wysokimi kosztami aparatury kontrolno-pomiarowej, koniecznością posiadania wysoko wykwalifikowanej kadry i stosunkowo długim czasem wykonywania testu. Testy pomiaru temperatury i momentu obrotowego mogą trwać od kilku minut do nawet 20 godzin, jak w przypadku jednego z największych na świecie producentów osi jezdnych – patrz rys. 1. To powoduje, że nie jest możliwe przeprowadzanie ich na liniach montażowych. Można je wykonać tylko w warunkach laboratoryjnych.

Niektórzy producenci pracują nad szybką metodą oceny momentu obrotowego łożysk z użyciem specjalistycznych urządzeń pozwalających na pomiar momentu przy zmiennym obciążeniu osiowym, zmiennych obrotach i ich kierunku. Przykładem takiego urządzenia pomiarowego jest momentomierz łożysk stożkowych zbudowany przez zespół naukowców z Politechniki Świętokrzyskiej i inżynierów z FŁT – Kraśnik S.A., pokazany na rys. 2.

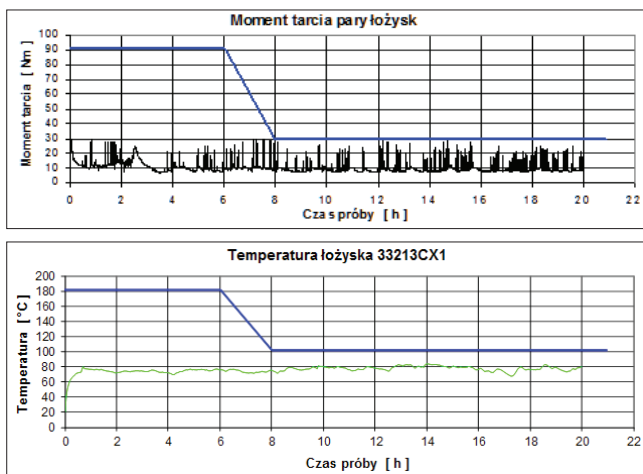


Fig. 1. Results of friction torque measurement (upper diagram) and temperature (lower diagram) of tapered roller bearings in the 20-hour test

Rys. 1. Wyniki pomiaru momentu tarcia (wykres górny) i temperatury (wykres dolny) łożysk stożkowych w teście 20-godzinny



Fig. 2. Torque gauge for tapered roller bearings
Rys. 2. Momentomierz łożysk stożkowych

Niewiele jest przypadków wykonywania testów zmontowanego zespołu na linii produkcyjnej. Należą do nich pomiary głośności i drgań silników elektrycznych oraz skrzyń biegów. W stosunkowo krótkim czasie, często nieprzekraczającym jednej minuty, ocenia się prawidłowość montażu i jakość elementów składowych. Jednak nie od razu można wskazać, który element zespołu jest wadliwy. Weryfikacja jest wykonywana przez specjalistów poza linią produkcyjną.

W przypadku montażu silników elektrycznych częstą przyczyną ich wadliwej pracy jest błąd popełniany podczas podgrzewania łożyska kulkowego przed założeniem na wał. Łożysko podgrzewa się do określonej temperatury w ściśle określonym czasie, by wykorzystując zjawisko rozszerzalności cieplnej, założyć je na wał silnika i uzyskać odpowiedni wcisk. Przekroczenie temperatury i skrócenie czasu grzania może doprowadzić do skasowania luzu poprzecznego i wytworzenia tzw. fałszywych odcisków Brinella na bieżniach pierścieni wewnętrznych w liczbie odpowiadającej rozmieszczeniu kulek w łożysku. Ich głębokość powiększa się wraz ze wzrostem temperatury.

Na rys. 3 pokazano wykres okrągłości pierścienia wewnętrznego łożyska 6317, który w wyniku nieprawidłowego podgrzewania łożyska przed montażem został uszkodzony przez elementy toczne. Pomiaru dokonano urządzeniem Talyrond 73, filtr Gaussa 15-500.

Niezmiernie ważnym elementem wpływającym na trwałość łożyska jest smarowanie. Ważny jest nie tylko rodzaj środka smarnego, ale również jego ilość, która powinna zostać dokładnie odmierzona według wskazań producenta. Tak nadmierna, jak i zbyt mała jego ilość prowadzi do przedwczesnego zużycia łożysk.

Kolejnym rodzajem problemów na liniach montażowych jest uzyskanie właściwego luzu wzdłużnego w łożyskach stożkowych i kulkowych skośnych

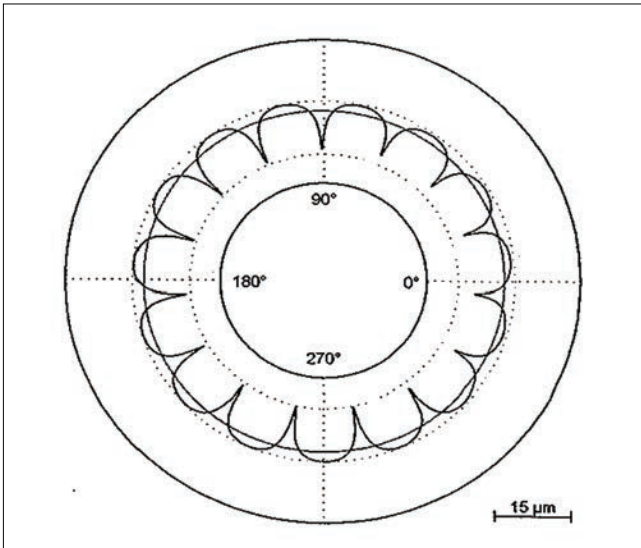


Fig. 3. Measurement of the roundness of the bearing inner ring 6317 obtained on the Talysond 73 device, Gauss filter 15-500

Rys. 3. Wynik pomiaru okrągłości pierścienia wewnętrznego łożyska 6317 uzyskany na urządzeniu Talysond 73, filtr Gaussa 15-500

(wykorzystywanych do łożyskowania kół napędowych i jezdnych samochodów) poprzez dokręcanie nakrętki za pomocą klucza dynamometrycznego. Niewłaściwie skalibrowany klucz dynamometryczny lub niewłaściwe się z nim obchodzenie powoduje powstawanie błędów montażu polegających na uzyskaniu zbyt dużego napięcia wstępnego lub luzu. W obu przypadkach może się to przyczynić do obniżenia trwałości łożysk.

Analizując miejsca powstawania błędów, konstruktorzy szukają rozwiązań na ich ograniczenie lub całkowitą eliminację. Przykładem tego są prace nad doskonaleniem i rozwojem łożyskowania kół napędowych i jezdnych w samochodach. Na ich podstawie powstało wiele rozwiązań konstrukcyjnych. Jednym z nich,

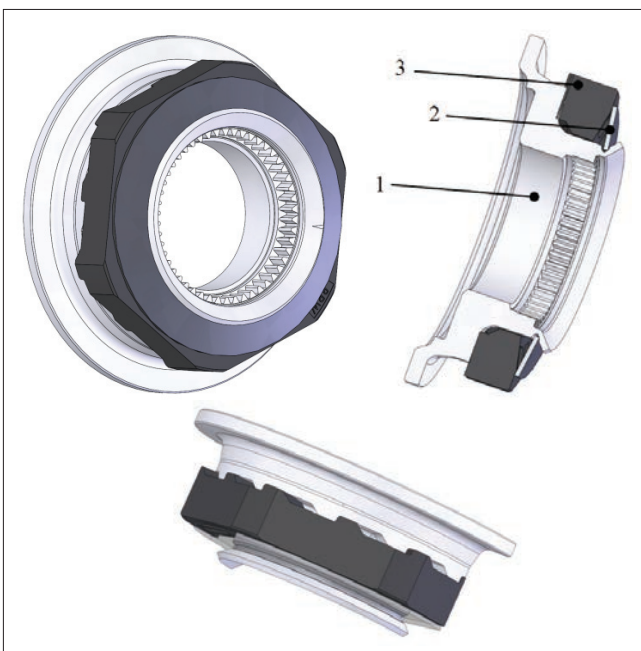


Fig. 4. Special nut for bearings: 1 – nut, 2 – plate spring, 3 – toothed washer

Rys. 4. Specjalna nakrętka do łożysk: 1 – nakrętka, 2 – sprężyna talerzowa, 3 – podkładka zębata

wdrożonym do produkcji w celu uproszczenia montażu, a także eliminacji dodatkowych narzędzi, jest zespół nakrętki łożyskowej (rys. 4).

Dzięki zastosowaniu specjalnie skonstruowanej nakrętki wyeliminowano konieczność stosowania klucza dynamometrycznego do uzyskania odpowiedniego napięcia wstępnego łożysk. Wymagany moment jest uzyskiwany poprzez napięcie sprężyny talerzowej współpracującej z podkładką zębatą, zazębiającą się ze stalową nakrętką. Jego wartość jest kontrolowana na specjalnych stanowiskach badawczych u producenta zespołu nakrętki. Rozwiązanie to jest z powodzeniem stosowane przy montażu łożysk stożkowych w kołach pojazdów ciężarowych.

Kolejnym etapem rozwoju jest zastosowanie kompaktowego łożyska kulkowego skośnego (rys. 5). W tym przypadku wykorzystano jeden pierścień zewnętrzny 1 z dwoma bieżniami oraz dwoma pierścieniami wewnętrznymi 2. Zaletami tego rozwiązania są szczelne i nasmarowane łożyska z ustalonym luzem wzdłużnym i poprzecznym, mniejszy ciężar w stosunku do piasty z dwoma łożyskami stożkowymi i znacznie ułatwiony montaż. To rozwiązanie zostało nazwane łożyskiem piastą pierwszej generacji.

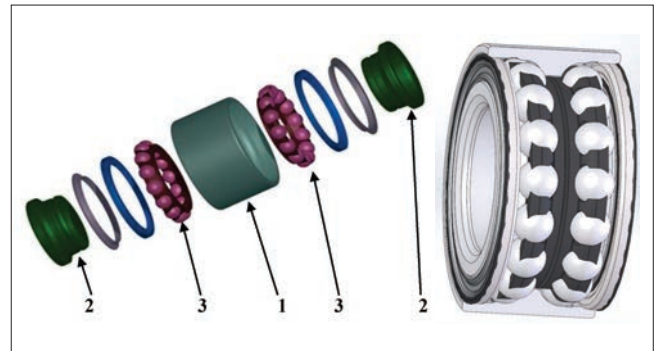


Fig. 5. An example of a design solution for a road wheel bearing with the use of a compact double-row angular contact ball bearing – hub-bearing of the first generation: 1 – outer ring, 2 – inner ring, 3 – ball basket

Rys. 5. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego łożyskowania koła jezdnego za pomocą kompaktowego łożyska kulkowego skośnego dwurzędowego – łożysko piasty pierwszej generacji: 1 – pierścień zewnętrzny, 2 – pierścień wewnętrzny, 3 – kosz z kulkami

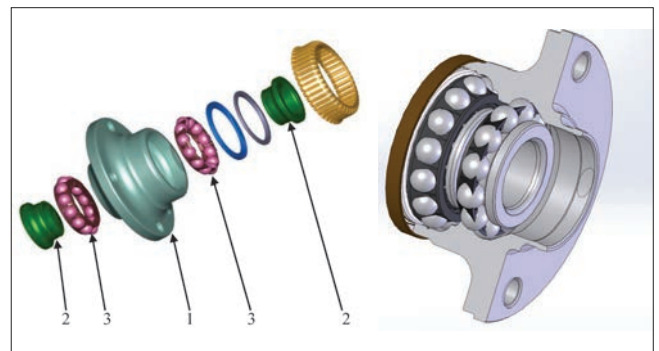


Fig. 6. An example of a constructional solution for a road wheel bearing with a second-generation hub bearing with the use of a ball bearing structure: 1 – outer ring with a collar, 2 – inner rings, 3 – basket with balls

Rys. 6. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego łożyskowania koła jezdnego za pomocą łożyska piasty drugiej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego: 1 – pierścień zewnętrzny z kołnierzem, 2 – pierścienie wewnętrzne, 3 – kosz z kulkami

Kolejne uproszczenie konstrukcji oraz dążenie do wysokiej niezawodności przy niemal całkowitej bezobsługowości zaowocowały powstaniem rozwiązania o nazwie łożysko piasty drugiej generacji (rys. 6). Tym razem pierścień zewnętrzny łożyska przejął funkcję obudowy z kołnierzem 1, do której mocowane są elementy wirujące układu hamulcowego i koło jezdne. W ten sposób zmniejszono liczbę elementów i masę oraz obniżono koszty produkcji.

Najbardziej zaawansowanym konstrukcyjnie i technologicznie rozwiązaniem łożyskowania kół jezdnych jest łożysko piasty trzeciej generacji (rys. 7) z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego. W tym przypadku pierścień zewnętrzny łożyska przejmuje funkcję obudowy z kołnierzem 1, tak jak w drugiej generacji, a pierścień wewnętrzny kołnierzowy, zwany często flanszą 4, pełni funkcję piasty, do której mocuje się tarczę hamulcową i koło jezdne. Na flanszy wykonana jest jedna bieżnia łożyskowa, drugą stanowi ty-

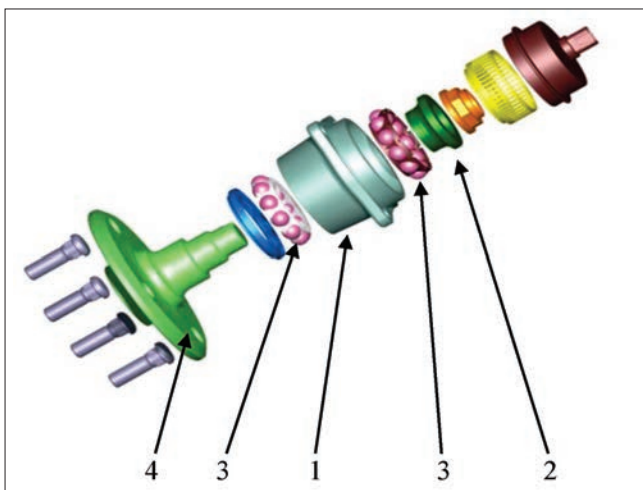


Fig. 7. An example of a design solution for a road wheel bearing with a third generation hub bearing with the use of a ball bearing structure: 1 – flanged outer ring, 2 – typical bearing inner ring, 3 – ball basket, 4 – flanged inner ring

Rys. 7. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego łożyskowania koła jezdnych za pomocą łożyska piasty trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego: 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – typowy łożyskowy pierścień wewnętrzny, 3 – kosz z kulkami, 4 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy

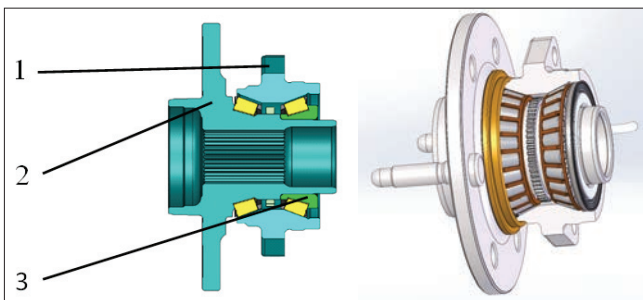


Fig. 8. An example of a constructional solution for a road wheel bearing with a third generation hub bearing with the use of a tapered roller bearing: 1 – flanged outer ring, 2 – flanged inner ring, 3 – typical bearing inner ring

Rys. 8. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego łożyskowania koła jezdnych za pomocą łożyska piasty trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska stożkowego: 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3 – typowy łożyskowy pierścień wewnętrzny

powy łożyskowy pierścień wewnętrzny 2. W otworze flanszy wykonany jest wielowypust do przenoszenia momentu obrotowego. Tego rodzaju zespół łożyskowania kół jest nasmarowany, nierozbieralny i praktycznie bezobsługowy.

Na rys. 8 pokazano przykład łożyska piasty trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska stożkowego.

Najbardziej zaawansowane rozwiązania gwarantują eliminację różnych czynności pomiarowych, uproszczenie fazy montażu, uzyskanie właściwych luzów, odpowiedniej ilości smaru, szczelności, trwałości i niezawodnej pracy elementów systemów ABS przez przewidziany okres. Podobnie w ASO uproszczono czynności serwisowe. W ten sposób wyeliminowano znakomitą liczbę przypadków błędnego montażu ku zadowoleniu klientów.

Podsumowanie i wnioski

Przy montażu łożysk bardzo ważne jest stosowanie odpowiednich systemów pomiarowych i sprawnych narzędzi pomiarowych. Nie zawsze jest to realizowane w małych firmach i stacjach serwisowych. Ocena zdolności narzędzi bądź systemów pomiarowych często nie jest wykonywana, a i wiedza na ten temat jest znikoma. Problemy pomiarowe podczas montażu maszyn stały się inspiracją inżynierów do poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych eliminujących na liniach montażowych konieczność wykonywania żmudnych pomiarów, segregacji czy tworzenia nomogramów. Klasycznym tego przypadkiem jest ewolucja łożyskowania kół napędowych i jezdnych pojazdów samochodowych.

Publikacja powstała w wyniku pracy badawczo-rozwojowej realizowanej przez Fabrykę Łożysk Tocznych Kraśnik S.A. wspólnie z Politechniką Świętokrzyską w ramach projektu pt. „Utworzenie Centrum B+R w FŁT Kraśnik S.A.” w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020, który jest współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego nr CBR/1/50-52/2017 z 07.04.2017 r.

LITERATURA

- [1] Wierzcholski K. „Probabilistyczne studium zatarcia łożysk ślizgowych i tocznych”. *Tribologia*. 4 (2015): 199–206, bwmeta1.element.baztech-da9d0390-c040-48c9-a262-024e6bdad417.
- [2] https://pwemag.co.uk/news/fullstory.php/aid/4440/A_perfect_fit_the_importance_of_mounting_bearings_properly.html (dostęp: 15.03.2022).
- [3] Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne (1982).
- [4] Adamczak S., Makiela W. „Podstawy metrologii i inżynierii jakości dla mechaników”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne (2010).
- [5] Sałaciński T. „Analiza zdolności narzędzi i systemów pomiarowych”. *Inżynieria Maszyn*. 17, 2 (2012): 75–83, bwmeta1.element.baztech-article-LODC-0002-0016. ■