

Stanowisko badawcze oraz metoda wyznaczania siły zrywającej połączenie cierne

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie związane z badaniem wpływu chropowatości powierzchni elementów połączenia wciskowego, na wielkość oporu wynikającego z momentu. Omówiono budowę stanowiska badawczego i metodykę badań. Zaprezentowano wyniki badań testowania stanowiska oraz wyznaczania oporów toczenia krążka pomocniczego.

Summary

The problem of testing the impact of roughness of pressing coupling surface on resistance resulting from a torque is presented in the paper. Design of testing facility as well as testing methodology is discussed. Results from testing the facility and from determination of auxiliary disk turning resistance.

1. Wprowadzenie

W pracach projektowych jednostki napędowej pojazdów szynowych pojawiła się potrzeba określenia wpływu stanu powierzchni czopa i piasty na wielkość oporu wynikającego z momentu obrotowego. Problem ten, wynikł z doboru rodzaju pasowania dla osadzenia części czynnej i biernej sprzęgła przeponowego łączącego silnik z przekładnią zębatą, metodą hydraulicznego rozpięcia piasty i osiowego włączania na czop. Postanowiono zbadać, jaki wpływ ma stan powierzchni na wielkość przenoszonego momentu w aspekcie montażu hydraulicznego [3].

Przeprowadzono badania na modelu matematycznym, metodą MES, gdzie symulowano montaż piasty na czopie. Aby uzyskać wyniki sił występujących w takim połączeniu, dla danego pasowania, zmieniono wymiar geometryczny o wartość R_a stosowanych w tego typu elementach. Takie podejście nie dało poprawnych wyników, ponieważ przy zastosowaniu numerycznej metody konieczne jest odwzorowanie kontaktu dwóch materiałów, a różnica wymiarów geometrycznych z uwzględnieniem wartości chropowatości jest mniejsza od błędu pomiaru. Aby uzyskać prawidłowe wyniki z uwzględnieniem chropowatości należałoby przeprowadzić modelowanie matematyczne nierówności chropowatości i badać odkształcenia występujące w wierzchołkach nierówności, co jest z punktu widzenia prowadzonych badań nieuzasadnione, ponieważ przy szlifowaniu, chropowatość powierzchni nie jest powtarzalna [4].

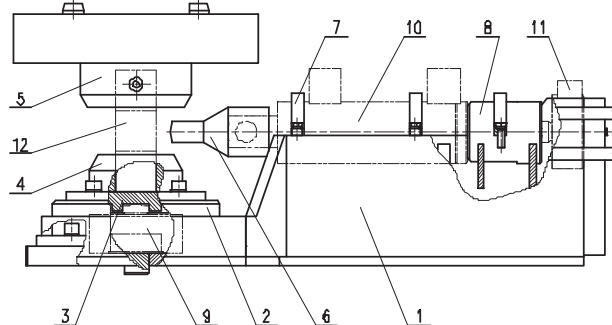
Aby było możliwe zastosowanie modelu MES do określenia zależności wcisku od przenoszonego momentu wynikającego z zastosowanego pasowania w modelu numerycznym wprowadza się wartości współczynnika tarcia, jak dotąd nie ma możliwości wprowadzenia wartości chropowatości. Aby móc uwzględnić w modelu numerycznym chropowatość

powierzchni należało wyznaczyć doświadczalnie zależność współczynnika tarcia od chropowatości powierzchni w kilku różnych wariantach.

Problem ten był inspiracją do przeprowadzenia badań stanowiskowych celem, których było wyznaczenie współczynnika tarcia w zależności od chropowatości powierzchni i wprowadzenia go do modelu matematycznego [4].

2. Konstrukcja i testy stanowiska badawczego

Do zbudowania stanowiska badawczego wykorzystano maszynę wytrzymałościową o maksymalnej sile nacisku 1000 kN. Jej zadaniem jest wytworzenie siły nacisku F_N , która odzwierciedla nacisk występujący w połączeniu czopowo-ciernym. Badane próbki mocowano w specjalnie przeznaczonym do tego celu przyrządzie (rys. 1).



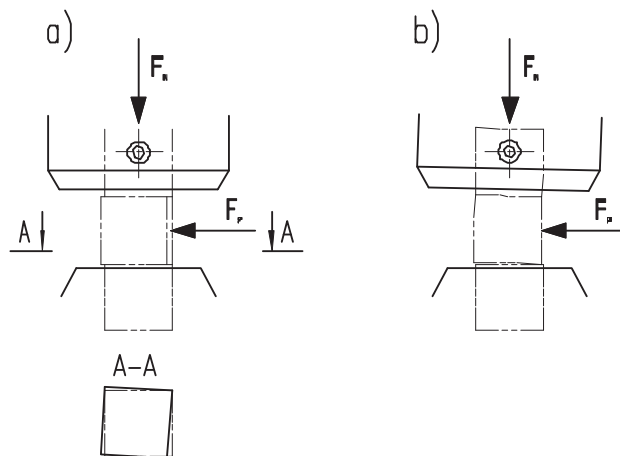
Rys.1. Przyrząd do mocowania próbek przed modyfikacją [2]:
1 - korpus, 2 - pokrywa przetwornika siły, 3 - płyta pośrednia,
4 - dolny uchwyt próbki, 5 - górny uchwyt próbki,
6 - popychacz, 7 - obejmę mocującą, 8 - opór siłownika,
9 - przetwornik siły, 10 - siłownik hydrauliczny do zadawania siły prostopadłej F_p , 11 - przetwornik siły, 12 - komplet próbek badawczych

Przyrząd składa się z kilku elementów połączonych ze sobą za pomocą elementów śrubowych. Pozwala to

na swobodny montaż i demontaż w maszynie wytrzymałościowej. Konstrukcja umożliwi umocowanie tensometrycznych przetworników (9, 11) do pomiaru siły normalnej F_N i prostopadłej F_P . Na odpowiednio przygotowanej płaszczyźnie korpusu (1) posadowiono przetwornik tensometryczny (9). Bezpośrednio na przetworniku umieszczono płytę pośrednią (3), prowadzoną w pokrywie przetwornika. Na tej pokrywie zamontowano element mocujący próbkę (4). W tej części wykonano tolerowany otwór, odpowiadający kształtem mocowanej w nim próbce (12). Uchwyt jest przelotowy, przez co próbka swobodnie osiada na płycie pośredniej (3), a uchwyt zapewnia jej stabilizację i możliwość przemieszczania w płaszczyznach równoległych do osi siły normalnej. Drugą część przyrządu zamocowano w suporcie ruchomym maszyny wytrzymałościowej. Do korpusu przykręcono uchwyt próbki górnej (5). Uchwyt nie jest przelotowy, gdyż próbka górna (12) służy tylko do docisku. Konstrukcja korpusu przyrządu umożliwia zamocowanie siłownika (10) za pomocą, którego zadawana będzie siła równoległa do płaszczyzn tarcia, odpowiadająca sile tarcia, do zadawania siły prostopadłej zrywającej połączenie cierne. Za siłownikiem zamocowano przetwornik tensometryczny (11), na który poprzez element pośredniczący, wywierana jest siła F_P .

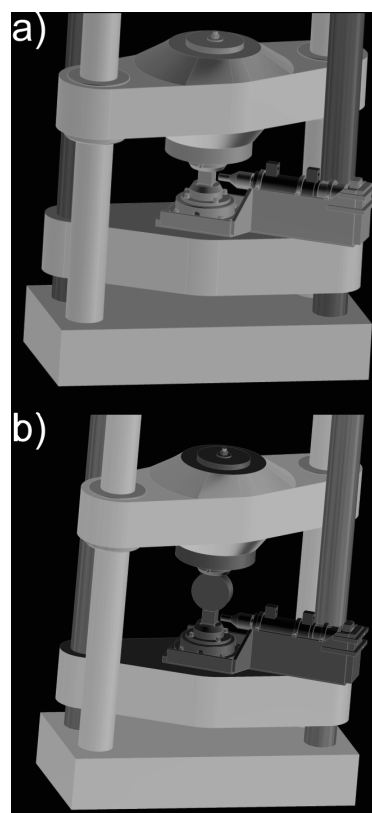
Próbka odzwierciedla fragment powierzchni połączenia czopowo-ciernego. Przy czym zamierza się przyjąć takie wymiary próbek, aby nacisk jednostkowy na płaszczyznach kontaktu odpowiadał naciskom stosowanym w praktyce. Powierzchnie próbek, poddane zostaną szlifowaniu, co będzie odzwierciedlać stan powierzchni czopa i piasty po obróbce. Próbki zostaną wykonane z materiału 41Cr4 (40H) ulepszonego cieplnie do twardości 40 ± 3 HRc.

W trakcie testowania stanowiska wystąpiły problemy, których nie można było przewidzieć na etapie jego projektowania (rys. 2). Podczas prób zerwania połączenia ciernego (zadawanie siły F_P) okazało się, iż próbka środkowa nie ulega przesunięciu równoległemu tylko następuje jej skręcenie w jednej, bądź w dwóch płaszczyznach (rys. 2a). Problem ten występował przy każdej zadanej wielkości siły normalnej. Po przeanalizowaniu wszystkich czynników występujących w tym niekorzystnym zjawisku okazało się, że zadawana siła zrywająca połączenie cierne nie jest przyłożona prostopadle do osi siły normalnej, co było to powodem skręcenia próbki względem drugiej. W celu wyeliminowania tego niekorzystnego zjawiska wprowadzono na boku próbki, w punkcie przecięcia się płaszczyzn podziału, otwór (wykonano nakiełek typu B), a w końcówce popychacza osadzonego na tłoczysku siłownika siły zrywającej wykonano otwór $\varnothing 2$ mm. Między popychacz, a próbkę wprowadzono kulkę łożyskową.



Rys.2. Przypadki nieprawidłowego procesu zerwania połączenia ciernego [opracowanie własne]: a) przypadek skręcenia w płaszczyźnie prostopadłej do siły normalnej F_N , przed wprowadzeniem wymuszonego osiowania siły prostopadłej F_P ; b) przypadek "zukośnienia" próbek po wprowadzeniu wymuszonego osiowania siły F_P

Po przeprowadzeniu kilku testów wystąpił kolejny problem. Okazało się, że dzięki prostopadłemu poprowadzeniu siły zrywającej występował luz konstrukcyjny na słupach prowadzących maszyny wytrzymałościowej. Efektem tego było blokowanie próbki z jednej strony, co powodowało unoszenie się jej po przeciwnej stronie wraz z suportem środkowym (rys. 2b).



Rys.3. Model stanowiska badawczego [opracowanie własne]: a) pierwotna wersja; b) stanowisko po modyfikacji

Podjęto próbę przekonstruowania przyrządu do układu, który usztywniałby uchwyt górny i dolny wraz

z bazą dolną, gwarantując przemieszczanie się próbek w zamierzony sposób. Było to, jednak zbyt kosztowne i mocno ingerujące w całe stanowisko. Innym rozwiązaniem problemu było wprowadzenie między próbkę w uchwycie górnym, a próbkę środkową krążka o średnicy 149 mm. Takie rozwiązanie nie ingerowało w już wykonany przyrząd. Zastosowany krążek wraz z kostką górną musiał mieć jednak lepsze własności niż próbki poddawane badaniom. Kolejne testy wykazały poprawne zachowanie całego układu badawczego i równoległe przemieszczanie się próbki względem drugiej.

Modyfikacja stanowiska, chociaż nie pociągała za sobą istotnych zmian konstrukcyjnych, spowodowała potrzebę wyznaczenia oporów toczenia krążka podczas zadawania siły F_p , co było wynikiem sposobu użycia krążka (rys. 3b).

3. Metoda badań

Zbudowane stanowisko pozwoli na wyznaczenie siły tarcia zrywającej połączenie i określenie współczynnika tarcia w zależności od chropowatości (rys. 4). Badania będą charakteryzować się tym, iż badane próbki będą miały tą samą twardość oraz powierzchnie różniące się chropowatością po szlifowaniu, przy czym powierzchnie sprzężenia ciernego próbek będą odpowiadały powierzchniom nominalnym próbek. Podczas badań zmienne będą wartości nacisków, odzwierciedlających warunki panujące w połączeniu czopowo-ciernym.

Badania zmierzać będą do:

- określenia, dla określonych chropowatości powierzchni, współczynnika tarcia w momencie zerwania połączenia ciernego, odzwierciedlającego połączenie czopowo-ciernie montowane metodą hydrauliczną,
- wyznaczenia wartości wcisków, w zależności od przenoszonego momentu obrotowego.

Mierzone będą i rejestrowane:

- wartości chropowatości powierzchni (pomiar wartości R_a oraz R_z),

- wartości siły normalnej do powierzchni nacisku,
- wartości siły zrywającej połączenie ciernie odpowiadającej sile tarcia,
- stan obciążonych powierzchni próbek przed i po zerwaniu sprzężenia ciernego.

Na podstawie pomiarów zostaną wyznaczone charakterystyki określające zależność współczynnika tarcia od chropowatości powierzchni.

Badania prowadzone będą w dwóch etapach (tabela 1). Pierwszy etap badań prowadzony będzie na próbkach suchych (odtłuszczonych). Drugi etap, będzie uwzględniał wprowadzenie między powierzchnie ciernie próbek, przed każdym dokonaniem nacisku i zerwaniem połączenia ciernego środka smarnego. Wprowadzenie czynnika smarnego odzwierciedlać ma sytuację jaka występuje po montażu czopa i piasty metodą hydrauliczną.

Każdy etap badań będzie składać się z trzech serii pomiarowych. Każda z serii będzie z inną konfiguracją próbek (z różnymi wartościami chropowatości powierzchni). W każdej serii, wykonanych będzie sześć pomiarów dla każdej wartości siły F_N .

Badania obejmować będą pomiary i rejestrację:

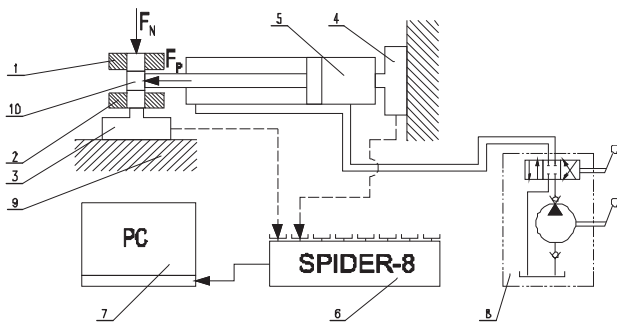
- wartości R_a i R_z , po obróbce szlifowaniem,
- obrazu warstwy wierzchniej wybranych próbek (mikroskop),
- wartości nacisku między próbkami, bez zrywania połączenia ciernego,
- wartości R_a i R_z , po dokonaniu nacisku bez zrywania połączenia ciernego,
- wartości nacisku między próbkami i siły zrywającej połączenie ciernie,
- wartości R_a i R_z , po zerwaniu połączenia ciernego.

Założono również wyznaczenie momentu zrywającego połączenie w sytuacji, gdy między współosiowymi powierzchniami czopa i piasty będzie wywarły nacisk odzwierciedlający warunki panujące w rzeczywistym połączeniu czopowo-ciernym.

Program badań [opracowanie własne]

Tabela 1

Serie pomiarowe	ETAP I Powierzchnie próbek odtłuszczone			ETAP II Powierzchnie próbek pokryte warstwą czynnika smarnego (gliceryna)		
	1	2	3	1	2	3
Wartość siły normalnej F_N [kN]	70, 120, 170			70, 120, 170		
Konfiguracja próbek według wartości R_a	0,2/0,2	0,2/1,0	1,0/1,0	0,2/0,2	0,2/1,0	1,0/1,0
Ilość pomiarów	6	6	6	6	6	6



Rys.4. Schemat stanowiska badawczego przed modyfikacją [opracowanie własne]: F_N - siła normalna, F_P - siła prostopadła; 1 - uchwyt górny, 2 - uchwyt dolny, 3 - przetwornik siły, 4 - przetwornik siły, 5 - siłownik do zadawania siły prostopadłej F_P , 6 - wzmacniacz pomiarowy, 7 - rejestrator cyfrowy, 8 - pompa hydrauliczna, 9 - suport dolny maszyny wytrzymałościowej, 10 - zestaw próbek do badań

$$F_t = \frac{f}{R} \cdot F_N \quad (1)$$

gdzie:

- F_t – siła tarcia występująca w układzie [kN],
- R – promień krążka pomocniczego [mm],
- F_N – siła normalna [kN],
- f – współczynnik oporów toczenia [mm].

Powyższą zależność zmodyfikowano w celu poznania siły, jaka będzie występować w przypadku doświadczalnego wyznaczania oporów toczenia, według schematu na rysunku 5a:

$$F' = 4 \left(\frac{f}{R} \cdot F_N \right) \quad (2)$$

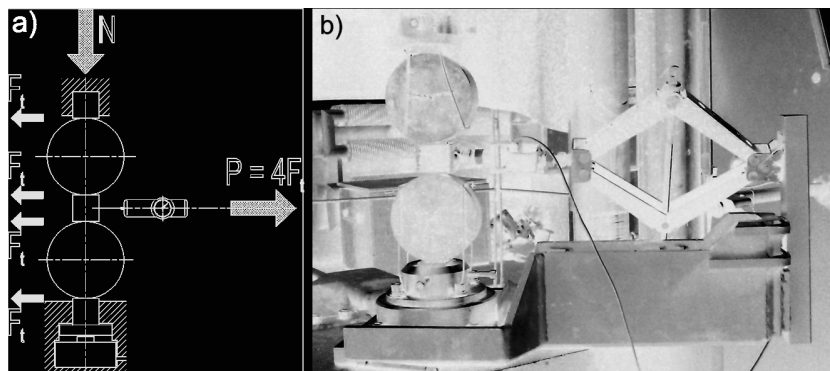
Wyznaczone analitycznie wartości siły tarcia F_t dla trzech sił normalnych wyniosły:

- dla 70 kN $\rightarrow F_t = 191,8$ kN,
- dla 120 kN $\rightarrow F_t = 328,77$ kN,
- dla 170 kN $\rightarrow F_t = 465,75$ kN.

Do obliczeń przyjęto standardowy współczynnik oporów toczenia (stal po stali), co nie było prawidłowym odniesieniem do właściwości materiału

4. Doświadczalne wyznaczenie oporów toczenia krążka pomocniczego

Wstępnie opory krążka określono metodą analityczną według schematu sił przedstawionego na rysunku 5a. Do wyliczenia siły tarcia przyjęto zależność [5, 7]:



Rys.5. Stanowisko do wyznaczenia oporów toczenia krążka pomocniczego: a) schemat sił podczas wyznaczania oporów [opracowanie własne]; b) zmodyfikowane stanowisko do wyznaczania oporów krążka [1]

Wartości pomiarów oporów toczenia krążka pomocniczego po próbkę [opracowanie własne]

Tabela 2

Wartość siły prostopadłej F_P dla kolejnych pomiarów [kN]	Nr pomiaru	Siła normalna [kN]		
		70	120	170
	p1	0,16	0,27	0,34
	p2	0,16	0,26	0,25
	p3	0,12	0,34	0,6
	p4	0,1	0,32	0,14
	p5	0,29	0,37	0,32
	p6	0,22	0,2	0,33
	p7	0,21	0,24	0,53
	p8	0,12	0,26	0,37
	p9	0,08	0,21	0,23
	p10	0,16	0,14	0,45
Wartość średnia arytmetyczna z 10 pomiarów		0,162	0,261	0,356

zastosowanego do wykonania próbek i krążka. Ze względu, że wyznaczone metodą obliczeniową opory toczenia krążka pomocniczego nie uwzględniały właściwości zastosowanego materiału, rzeczywiste wartości oporów toczenia krążka wyznaczono doświadczalnie.

Opory toczenia krążka wyznaczono na tym samym stanowisku (rys. 5b), na którym mierzone będą siły między powierzchniami badawczymi próbek, które to próbki będą tych samych właściwościach, co zastosowane do wyznaczenia współczynnika tarcia ciernego. Dokonano niezbędnej modyfikacji przyrządu, co pozwoliło na zainstalowanie przetwornika siły w specjalnym uchwycie. Poprzez obejmę przeciągano próbkę do momentu przejścia ze spoczynku do ruchu krążka po kostce, mierząc jednocześnie wartość siły jak wystąpiła w momencie zerwania połączenia ciernego. Uzyskane w ten sposób wyniki uwzględniono w obliczeniach siły zrywającej połączenie ciernie między kostkami podczas prowadzenia serii pomiarowych.

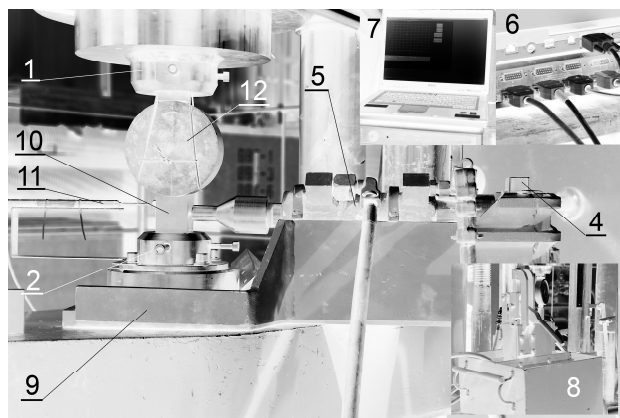
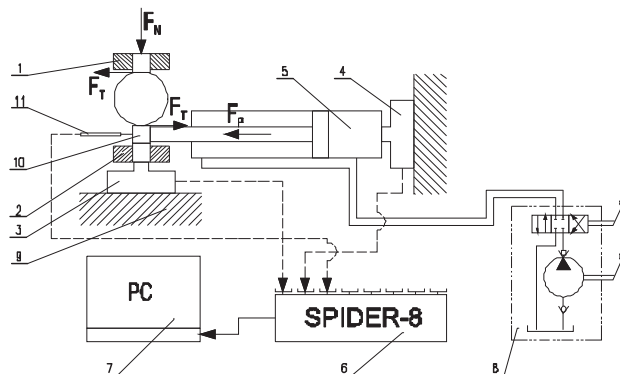
Ze względu na potrzebę wyznaczenia oporów toczenia krążka rozszerzono dodatkowo wartości mierzone o wyznaczenie siły, jaka wynika z oporów toczenia krążka zastosowanego w układzie badawczym. W programie wyznaczania oporów krążka przewidziano wykonanie dziesięciu pomiarów i wyznaczenie średniej arytmetycznej ich wartości (tabela 2), dla każdej wartości siły normalnej. Średnie wartości uwzględnione będą w zarejestrowanej sile prostopadłej, która posłuży do wyznaczenia współczynnika tarcia.

Do wyznaczenia oporów toczenia użyto drugiego krążka o takich samych właściwościach. Zbudowany układ pozwalał w prosty sposób wyznaczyć opory toczenia.

5. Stanowisko badań po korektach

Po wyznaczeniu oporów toczenia krążka pomocniczego przyrząd przystosowano do określania siły tarcia między próbkami, uzbrajając go dodatkowo w przetwornik do pomiaru drogi, celem określenia punktu zerwania połączenia ciernego. Zmodyfikowane stanowisko (rys. 6) zawiera następujące elementy:

- dwuczęściowy przyrząd do mocowania próbek i siłownika zrywającej połączenie (poz. 1, 2),
- tensometryczny przetwornik siły F_N , F_P (poz. 3, poz. 4),
- siłownik korekcyjny (poz. 5),
- wzmacniacz sygnału pomiarowego (poz. 6),
- rejestrator cyfrowy (poz. 7),
- pompa hydrauliczna zasilająca siłownik (poz. 8),
- maszyna do badania wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie z pulsatorem (poz. 9),
- komplet próbek testowych (poz. 10),
- liniowy przetwornik drogi (poz. 11).



Rys.6. Zmodyfikowane stanowisko do wyznaczenia siły tarcia [opracowanie własne] [1]

6. Podsumowanie

Przedstawione w opracowaniu stanowisko badawcze oraz metoda wyznaczenia współczynnika tarcia dla warunków, jakie występują w połączeniach czopowo-ciernych, umożliwi określenie siły tarcia w połączeniu czopowo-ciernym, a stąd również współczynnik tarcia występujący w tym połączeniu.

Uzyskane w ten sposób wyniki umożliwią wyznaczenie zależności współczynnika tarcia od chropowatości powierzchni, w kilku różnych wariantach współpracy powierzchni o różnych wartościach chropowatości. Skonstruowane stanowisko badawcze dzięki swej modułowej budowie pozwoli również na wykonanie innych badań niż przedstawione w niniejszym artykule.

Literatura

1. Dokumentacja fotograficzna ITG KOMAG.
2. Dokumentacja konstrukcyjna. Stanowisko do wyznaczania siły zrywającej połączenie ciernie W93.127. ITG KOMAG. Gliwice 2011 (materiały nie publikowane).
3. Drwięga A. i in.: Zespół napędowy pojazdu szynowego. Badania modelowe komponentów sprzęgieł zespołu napędu tramwaju. CMG KOMAG, Gliwice 2006 (materiały nie publikowane).

-
4. Janas S. i in.: Analiza naprężeń w połączeniu stożkowo-ciernym przy użyciu MES. Określenie parametrów nośności połączenia stożkowo-ciernego z uwzględnieniem wartości chropowatości. ITG KOMAG, Gliwice 2010 (materiały nie publikowane).
 5. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
 6. Praca zbiorowa: Poradnik obsługi technicznej łożysk. SKF, 1994.
 7. Skoć A., Spatek J.: Podstawy Konstrukcji Maszyn. T.1. Obliczenia konstrukcyjne, tolerancje i pasowania połączenia. WNT, Warszawa 2006.

Artykuł wpłynął do redakcji w sierpniu 2013 r.