

Piotr ADAMIEC, Kazimierz WITASZEK, Mirosław WITASZEK

ZUŻYCIE EKSPLOATACYJNE KÓŁ LOKOMOTYW SM42 I ET41

Streszczenie. W pracy przeprowadzono badania zużycia kół lokomotyw serii SM42 i ET41. Wyniki tych badań zastosowano do obliczenia intensywności zużycia eksploatacyjnego kół tych pojazdów oraz ich trwałości i niezawodności. Do oceny niezawodności wykorzystano rozkład Weibulla.

SERVICE WEAR OF WHEELS OF LOCOMOTIVES SM42 AND ET41

Summary. In this work research of wear intensity of tyres of locomotives SM42 and ET41 has been made. Results of these experiments have been used to calculate service wear intensity, durability and reliability of wheels of these vehicles. Reliability assessment has been done with the aid of Weibull's distribution.

1. BADANIA EKSPLOATACYJNE ZUŻYCIA KÓŁ LOKOMOTYW

Para trybologiczna koło kolejowe - szyna należy do skojarzeń pracujących w trudnych warunkach. Powodują one intensywne zużycie elementów tej pary. Zużycie to ma duży wpływ na niezawodność kół i szyn kolejowych, która decyduje o bezpieczeństwie jazdy.

W celu wyznaczenia trwałości i niezawodności kół kolejowych wykorzystano wyniki pomiarów zużycia kół pojazdów szynowych eksploatowanych na PKP. Pomiary takie były przeprowadzane w Zakładach Taboru podczas przeglądów okresowych pojazdów, zaś ich wyniki rejestrowano. Na potrzeby niniejszej pracy zebrano wyniki pomiarów kół lokomotyw serii SM42 i ET41 z Zakładu Taboru Czechowice Dziedzice. Pomiary były przeprowadzane w latach 1990-1997. Zgromadzono wyniki pomiarów kół 13 lokomotyw spalinowych serii SM42 obejmujące 33 przebiegi międzynaprawcze oraz 13 lokomotyw elektrycznych serii ET41 obejmujące 27 przebiegów międzynaprawczych. Lokomotywy były wyposażone w koła obręczowane, regenerowane przez toczenie.

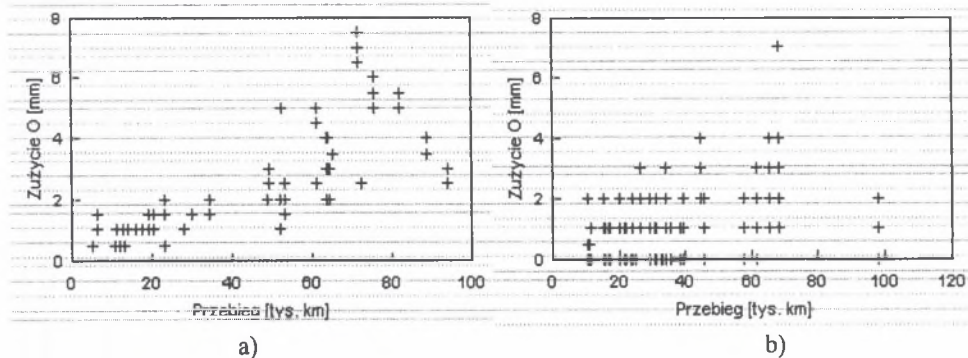
Zebrane dane zawierają następujące wymiary: grubość obręczy (O), grubość obrzeża (Og) i stromość obrzeża (qr) z pierwszego i ostatniego pomiaru w danym przebiegu międzynaprawczym, daty tych pomiarów oraz przebieg pojazdu w tym czasie. Zużycie stanowi różnica wymiaru początkowego i końcowego:

- dla grubości obręczy: $Z = O_1 - O_2$,
- dla grubości obrzeża: $Z = Og_1 - Og_2$,

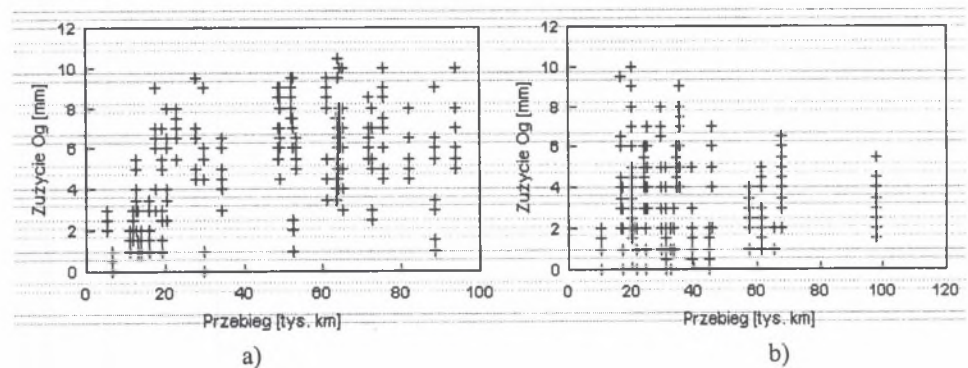
- dla stromości obrzeża: $Z = qr_1 - qr_2$.

Uzyskane w wyniku badań wartości zużycia liniowego w mm przedstawiono na rys. 1 - 3.

Z rys. 1 - 3 wynika, że zależność zużycia kół kolejowych od przebiegu cechuje znaczny rozrzut. Szczególnie widoczny jest on w przypadku zużycia obrzeża. Podobnie jak w zaobserwowanych wcześniej przypadkach, zużycia kół przedstawionych w pracach [1 - 3] o konieczności przeprowadzenia naprawy kół, czyli o trwałości cząstkowej decydowało zużycie grubości obrzeża, nie zaś jego stromości.

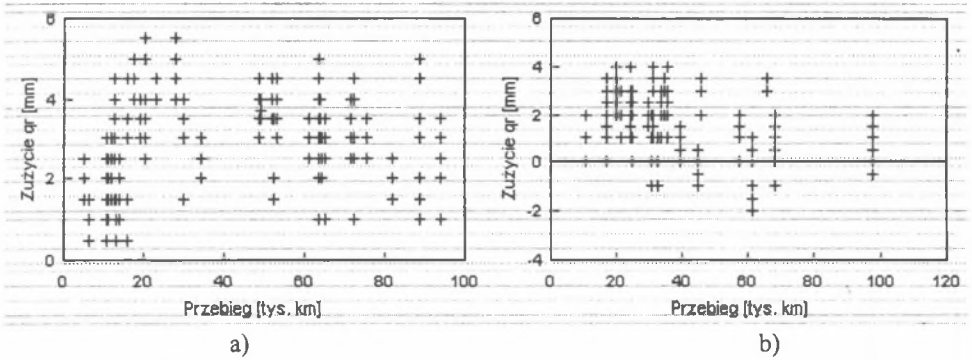


Rys.1. Zużycie liniowe grubości obręczy lokomotyw: a) spalinowych serii SM42, b) elektrycznych serii ET41
Fig.1. Linear wear of tyre thickness of: a) diesel locomotives series SM42, b) electric locomotives series ET41



Rys. 2. Zużycie liniowe grubości obrzeża lokomotyw: a) spalinowych serii SM42, b) elektrycznych serii ET41
Fig. 2. Linear wear of flange thickness of: a) diesel locomotives series SM42, b) electric locomotives series ET41

Ponadto dla lokomotyw ET41 zaobserwowano przypadki wzrostu wymiaru qr w czasie eksploatacji (rys. 8.11b). O trwałości ogólnej obręczy decydowało natomiast zużycie grubości obręczy. Do dalszej analizy wybrano zatem zużycie grubości obręczy i grubości obrzeża.



Rys. 3. Zużycie liniowe stromości obrzeża lokomotyw: a) spalinowych serii SM42, b) elektrycznych serii ET41
 Fig. 3. Linear wear of flange steepness of: a) diesel locomotives series SM42, b) electric locomotives series ET41

2. OKREŚLANIE TRWAŁOŚCI I NIEZAWODNOŚCI KÓŁ

Wyniki badań eksploatacyjnych zużycia pozwoliły na wyznaczenie przebiegu międzyprawczego (trwałości cząstkowej) i związanej z nim niezawodności. Do określenia trwałości i niezawodności na podstawie badań eksploatacyjnych konieczna jest znajomość charakteru zależności zużycia od przebiegu. W niniejszej pracy do opisanie tej zależności zaproponowano wzory (1) i (2):

$$Z = c_1 + c_2 \cdot L, \quad (1)$$

$$Z = c_1 \cdot L^{c_2}, \quad (2)$$

gdzie: Z - zużycie, L - przebieg koła, c_1 , c_2 - stałe.

W celu wyboru wzoru przeprowadzono regresję wyników badań eksploatacyjnych zużycia z rys. 1 i 2. Otrzymane wartości współczynników regresji c_1 i c_2 oraz kwadratów współczynników korelacji zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Uzyskane wartości R^2 nie są wysokie, co świadczy o znacznym rozrzucie wyników badań. Szczególnie niskie wartości kwadratu współczynnika korelacji uzyskano dla zużycia grubości obrzeża Og. Wartości R^2 dla obu rodzajów regresji są na ogół zbliżone. Część przypadków wykazuje lepszą korelację dla regresji liniowej, według wzoru (1), część dla potęgowej - wzór (2). Mając to na uwadze, do określenia trwałości i niezawodności przyjęto znacznie prostszą w obliczeniach regresję liniową.

Tabela 1

Wartości współczynników regresji c_1 i c_2 oraz kwadratów współczynników korelacji R^2 wyników eksploatacyjnych badań zużycia w okręgu tocznym

Pojazd	Zużycie w okręgu tocznym					
	$Z = c_1 + c_2 \cdot L$			$Z = c_1 \cdot L^{c_2}$		
	c_1	c_2	R^2	c_1	c_2	R^2
SM42	0,22978	0,00005	0,629	0,00044	0,79859	0,766
ET41	-0,04357	0,00002	0,174	0,10938	0,24625	0,086

Tabela 2

Wartości współczynników regresji c_1 i c_2 oraz kwadratów współczynników korelacji R^2 wyników eksploatacyjnych badań zużycia grubości obrzeża

Pojazd	Zużycie grubości obrzeża					
	$Z = c_1 + c_2 \cdot L$			$Z = c_1 \cdot L^{c_2}$		
	c_1	c_2	R^2	c_1	c_2	R^2
SM42	2,55564	0,00005	0,304	0,00701	0,60917	0,287
ET41	4,32194	$-1,7 \cdot 10^{-5}$	0,022	15,96312	-0,15601	0,017

Pierwszym krokiem do wyznaczenia trwałości i niezawodności jest obliczenie liniowej intensywności zużycia I_e :

$$I_e = \frac{\partial Z}{\partial L} \quad (3a)$$

Przyjęcie wzoru (1) do opisu zależności zużycia od przebiegu jest równoznaczne z założeniem, że liniowa intensywność zużycia koła nie zależy od jego przebiegu. Można ją wówczas obliczać ze wzoru:

$$I_e = \frac{\Delta Z}{\Delta L} \quad (3b)$$

Trwałość T_i rozumianą jako przebieg do osiągnięcia zużycia dopuszczalnego określono ze wzoru:

$$T_i = \Delta L = \frac{\Delta Z_{dop}}{I_e} \quad (4)$$

Występującą we wzorze (4) wielkość ΔZ_{dop} obliczano następująco:

- dla okręgu tocznego:

$$\Delta Z_{dop} = Z_{dop} = O_0 - O_{dop} \quad (5a)$$

- dla grubości obrzeża:

$$\Delta Z_{dop} = Z_{dop} = Og_0 - Og_{dop} \quad (5b)$$

- dla wysokości obrzeża:

$$\Delta Z_{dop} = Z_{dop} = O_{w_{dop}} - O_{w_0} = \Delta O_{dop}, \quad (5c)$$

gdzie: O_0 - początkowa grubość wieńca koła w okręgu tocznym, O_{dop} - dopuszczalna grubość wieńca koła w okręgu tocznym, O_{g_0} - początkowa grubość obrzeża, $O_{g_{dop}}$ - dopuszczalna grubość obrzeża, O_{w_0} - początkowa wysokość obrzeża, $O_{w_{dop}}$ - dopuszczalna wysokość obrzeża, ΔO_{dop} - dopuszczalne zużycie w okręgu tocznym ze względu na wzrost wysokości obrzeża.

Równanie (5a) odnosi się do trwałości ogólnej, natomiast równania (5b) i (5c) do trwałości cząstkowej (przebiegu międzynaprawczego). Ponieważ w niniejszym artykule rozpatrzono trwałość cząstkową, więc wykorzystano równanie (5b) dla zużycia obrzeża i (5c) dla powierzchni tocznej.

Osiągnięcie zużycia dopuszczalnego przez choćby tylko jedno koło powoduje konieczność reprofilacji wszystkich kół pojazdu. Większość kół, dla których zebrano wyniki pomiarów zużycia, była więc reprofilowana przed osiągnięciem zużycia dopuszczalnego. Dlatego w celu wyznaczenia niezawodności dla każdego koła obliczono oddzielnie intensywność zużycia oraz trwałość T_i powierzchni tocznej i obrzeża według wzoru (4), którą nazwano obliczeniową. Początkowe wymiary grubości wieńca i obrzeża mogą przyjmować różne wartości, nawet dla kół tego samego pojazdu. Aby było możliwe porównanie trwałości wyznaczonych z badań eksploatacyjnych z wynikami obliczeń na podstawie badań laboratoryjnych, konieczne było przyjęcie w obu obliczeniach jednakowych wartości wymiarów początkowych dla każdego rodzaju pojazdu. Przyjęto, że początkowa grubość obrzeża O_{g_0} wynosi 32,5 mm dla wszystkich rozpatrywanych pojazdów. Jako dopuszczalną grubość obrzeża $O_{g_{dop}}$ przyjęto 22 mm [4]:

Dla powierzchni tocznej założono, że zużycie ΔO_{dop} (w okręgu tocznym) wynosi 8 mm.

Otrzymane dla każdej z pięciu grup pojazdów trwałości obliczeniowe uporządkowano w ciąg niemalejący, tzn.:

$$T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_k \leq \dots \leq T_n \quad (6)$$

gdzie: n - liczba uzyskanych trwałości obliczeniowych.

Jako oszacowanie punktowe prawdopodobieństwa $F(T_k)$ zdarzenia, że koło osiągnęło wymiar dopuszczalny, tzn. że przeszło w stan niezdatności w przedziale $t \in (0, T_k)$ przyjęto wartość $F^*(T_k)$ obliczoną ze wzoru podanego w pracy [5]:

$$F^*(T_k) = \frac{k}{n+1} \quad (7)$$

Zależność $F^*(t)$ nazwano *obliczeniową funkcją zawodności kół kolejowych*.

Funkcja:

$$R^*(t) = 1 - F^*(t) \quad (8)$$

nosi nazwę *obliczeniowej funkcji niezawodności*.

Następnie określono analityczną postać funkcji zawodności $F(t)$ i niezawodności $R(t)$, którą nazwano odpowiednio *funkcją zawodności* i *niezawodności*. W celu określenia tych funkcji posłużono się szeroko rozpowszechnionym w teorii niezawodności rozkładem Weibulla, w którym funkcja zawodności jest opisana równaniem [1]:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right], \quad (9)$$

gdzie: a i b są parametrami rozkładu Weibulla, przy czym a nosi nazwę parametru skali, zaś b - parametru kształtu.

W celu wyznaczenia tych parametrów dwukrotnie zlogarytmowano równanie (9) i po odpowiednich przekształceniach otrzymano:

$$\ln\{-\ln[1-F(t)]\} = -b \cdot \ln a + b \cdot \ln t \quad (10)$$

Jest to równanie funkcji liniowej $y' = a' + b' \cdot x'$, gdzie $y' = \ln\{-\ln[1-F(t)]\}$, $a' = -b \cdot \ln a$ natomiast $x' = \ln t$. Zatem parametry a' i b' można wyznaczyć przeprowadzając regresję liniową funkcji:

$$\ln\{-\ln[1-F^*(T_i)]\} = -b' \cdot \ln a' + b' \cdot \ln T_i \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Parametr a obliczono z zależności:

$$a = \exp\left(-\frac{a'}{b'}\right). \quad (11)$$

Jakość regresji oceniono, tak jak poprzednio, za pomocą kwadratu współczynnika korelacji R^2 . Otrzymane wartości parametrów rozkładu Weibulla oraz R^2 przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

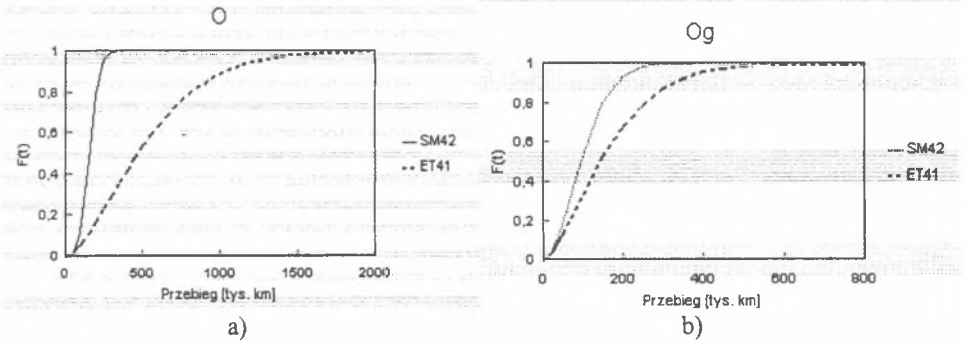
Wartości parametrów rozkładu Weibulla oraz R^2 funkcji zawodności i niezawodności kół kolejowych

Pojazd	Zużycie w okręgu tocznym			Zużycie grubości obrzeża		
	parametry rozkładu Weibulla		R^2	parametry rozkładu Weibulla		R^2
	a	b		a	b	
SM42	174032	3,132	0,975	117102	1,862	0,931
ET41	596756	1,526	0,876	183038	1,475	0,910

Otrzymane wartości współczynnika R^2 są wysokie, zatem można przyjąć, że funkcja zawodności kół rozpatrywanych pojazdów jest opisana rozkładem Weibulla z obliczonymi parametrami a i b . Ich znajomość pozwala na zbudowanie wykresów funkcji zawodności $F(t)$ i niezawodności $R(t)$:

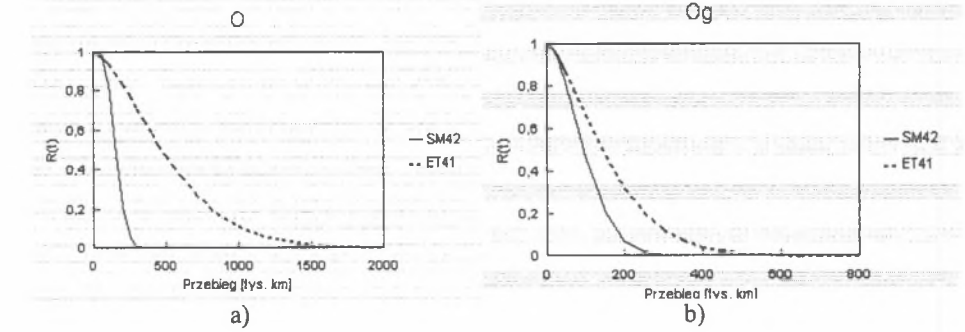
$$R(t) = 1 - F(t) \quad (12)$$

Otrzymane wykresy funkcji zawodności dla rozpatrywanych pojazdów przedstawiono na rys.4. Wykresy niezawodności przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Funkcja zawodności kół badanych pojazdów ze względu na: a) zużycie w okręgu tocznym, b) zużycie grubości obrzeża

Fig. 4. Unreliability functions for wheels of researched vehicles for: a) tread wear, b) flange wear



Rys. 5. Funkcja niezawodności kół badanych pojazdów ze względu na: a) zużycie w okręgu tocznym, b) zużycie grubości obrzeża

Fig. 5. Reliability functions for wheels of researched vehicles for: a) tread wear, b) flange wear

W celu obliczenia trwałości przy zadanej niezawodności \$R_n\$ wyliczono z równania (10) wielkość \$t\$ i po uwzględnieniu równania (12) otrzymano:

$$t = T_R = \exp \left[\frac{\ln(-\ln R_n) + b \cdot \ln a}{b} \right] \quad (13)$$

Obliczone wartości \$T_R\$ zestawiono w tabelach 4 i 5.

Tabela 4

Trwałość kół badanych pojazdów szynowych ze względu na zużycie w okręgu tocznym

Pojazdy	Niezwadność \$R_n\$				
	0,95	0,75	0,5	0,25	0,05
trwałość ze względu na zużycie w okręgu tocznym \$T_R\$ [km]					
SM42	67426	116921	154815	193159	247030
ET41	85231	263793	469355	739169	1224653

Tabela 5

Trwałość kół badanych pojazdów szynowych ze względu na zużycie grubości obrzeża

Pojazdy	Niezawodność R_n				
	0,95	0,75	0,5	0,25	0,05
	trwałość ze względu na zużycie grubości obrzeża T_R [km]				
SM42	23758	59976	96179	139556	211091
ET41	24433	78649	142766	228412	385129

3. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń pozwalają stwierdzić, że na podstawie wyników badań eksploatacyjnych możliwe jest określenie trwałości i niezawodności kół kolejowych. Zgodnie z oczekiwaniami, średnia trwałość kół lokomotyw manewrowych serii SM42 okazała się niższa niż kół lokomotywy liniowej serii ET41. Różnice są zwłaszcza widoczne w przypadku powierzchni tocznej (rys. 4a i 5a). Powierzchnie toczne kół lokomotyw wykazują zatem większą intensywność zużycia. Jest to wynikiem charakteru pracy tych lokomotyw, obejmującego częste rozruchy i hamowania, m.in. całych składów wagonów samą lokomotywą. Z tabeli 4 wynika, że trwałość kół lokomotyw SM42, ze względu na zużycie powierzchni tocznej, dla 50% niezawodności, jest aż trzykrotnie niższa niż analogiczna trwałość kół lokomotyw ET41. Różnice trwałości kół obu lokomotyw, ze względu na zużycie obrzeża, wyrażone spadkiem jego grubości, nie są już takie duże. Z tabeli 5 wynika, że trwałość kół lokomotyw ET41 dla 50% niezawodności jest o około 40% większa niż dla kół lokomotyw SM42. Przyczyną tej różnicy, oprócz pracy obejmującej częste rozruchy i hamowania powodujące większe poślizgi kół po szynach niż w przypadku lokomotywy liniowej, może być również praca w obrębie stacji, wymagająca częstszego pokonywania rozjazdów.

Porównanie rysunków 4a z 4b oraz 5a z 5b, a także tabeli 4 z tabelą 5 prowadzi do wniosku, że dla obu badanych serii lokomotyw trwałość kół ze względu na zużycie obrzeża jest niższa od trwałości kół ze względu na zużycie powierzchni tocznej. Dla lokomotywy manewrowej serii SM42, o wspomnianej wysokiej intensywności zużycia powierzchni tocznej, trwałość kół ze względu na zużycie tej powierzchni jest przeciętnie 1,5-krotnie wyższa od trwałości ze względu na zużycie obrzeża. Dla lokomotywy liniowej ET41 stosunek tych trwałości wynosi ok. 3.

Literatura

1. Bejenka K., Marciniak Z., Medwid M.: Wpływ smarowania obrzeży kół lokomotyw spalinowych i elektrycznych na tempo ich zużycia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport, z. 15, Gliwice 1990, s. 51-58.
2. Środki zapobiegające nadmiernemu zużyciu się obręczy zestawów kołowych lokomotyw na terenach górskich. Praca COBiRTK, nr 3365/11, Warszawa 1978.
3. Overkott F.: Hartowanie obrzeży obręczy zestawów kołowych i wagonów. Trakcja i Wagon, nr 4-5, 1983, s. 121-126.

4. Mt 11 - Instrukcja pomiarów geometrycznych zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych PKP. Dyrekcja Generalna PKP. Warszawa 1995.
5. Magiera J., Piec P.: Ocena zużycia i niezawodności pojazdów szynowych. Cz.I. Ossolineum, Wrocław, Warszawa, Kraków 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Edmund Tasak

Abstract

Tribological pair wheel - rail works in difficult conditions which causes intensive wear of its elements. This wear significant reduces durability of rail wheels. This article presents calculations of durability and reliability of wheels of locomotives series SM42 and ET41 that work on Polish Railways. Calculations have been done on the basis of measurements of wheel profile during service in Depot Czechowice Dziedzice. Reliability assessment has been done with the aid of Weibull's distribution. Calculations' results show that wear of flanges is more intensive than treads for both locomotives.