

Ocena kosztu cyklu życia szyn kolejowych w modernizacji układów geometrycznych

Kamila Szwackiewicz, Jacek Szmagliński



mgr inż. Kamila Szwackiewicz

Katedra Transportu Szynowego
i Mostów
Wydział Inżynierii Lądowej i
Środowiska
Politechnika Gdańska
kamszac@pg.gda.pl



mgr inż. Jacek Szmagliński

Katedra Transportu Szynowego
i Mostów
Wydział Inżynierii Lądowej i
Środowiska
Politechnika Gdańska
jacszmag@pg.gda.pl

LCC (akronim od słów Life Cycle Cost) to całkowity, skumulowany koszt produktu w całym jego cyklu życia [6]. Cykl życia obiektu technicznego rozpoczyna się w momencie podjęcia prac koncepcyjnych nad nim, do chwili jego fizycznej likwidacji (złomowania lub recyklingu) [17]. Pierwsze próby zastosowania metod LCC, do analizy kosztów ponoszonych w przemyśle kolejowym, rozpoczęto w Szwecji na początku lat osiemdziesiątych [5]. W 1986 roku ADtranz (producent pojazdów kolejowych) i Swedish State Railways (przedsiębiorstwo kolejowe) podpisali kontrakt na zastosowanie metody Life Cycle Costing do oceny kosztowności wprowadzanego pociągu dużych prędkości X2000 [10,14]. Założono, że na każdym etapie cyklu życia pociągu, spełnione muszą być wymogi modelu RAM, dotyczące niezawodności (Reliability), dostępności (Availability) i naprawialności (Maintainability). Do końca lat osiemdziesiątych, koncentrowano się głównie na analizie cyklu życia pojazdów kolejowych. W 1991 roku została założona organizacja UNIFE, której celem miało być usprawnienie działania podzielonych i zróżnicowanych zarządów kolejowych w obrębie Europy. System kolei został zdefiniowany jako wspólny rynek, oparty na jednolitych standardach. Zaczęto również stosować pojęcie Total Railway System [9], oznaczające traktowanie wszystkich elementów systemu jako całości. Przedstawione założenia spowodowały przeniesienie analiz LCC na drogę szynową.

Obserwowana w Polsce praktyka projektowa, przy budowie i modernizacji tras kolejowych, zakłada najczęściej inwestycje wykonywane w formule "projektuj i buduj".

W zestawieniu ze stosowanym najczęściej kryterium doboru wykonawcy, jakim jest najniższa cena, dochodzić może do niekorzystnego zjawiska zwiększania wagi kosztu inwestycyjnego przy jednoczesnym niedocenywaniu kosztów eksploatacyjnych. Tymczasem oszczędności poczynione w czasie inwestycji najczęściej są znacznie mniejsze niż długofalowe koszty, ponoszone na likwidację stanów niezdatności bądź ograniczonych właściwości użytkowych trasy kolejowej. W interesie zarządcy infrastruktury powinno być określanie całkowitych nakładów ponoszonych przez okres eksploatacji danego fragmentu linii kolejowej, przykładowo za pomocą analiz LCC.

Zastosowanie analiz LCC dla linii kolejowych

Zgodnie z Normą EN 60300-3-3 podstawowymi fazami cyklu życia są [6]:

- koncepcja i definiowanie;
- projektowanie i rozwój;
- wytwarzanie;
- instalowanie;
- użytkowanie i obsługiwanie;
- likwidacja.

Podobne podejście zostało zaprezentowane w wytycznych przedstawionych przez UNIFE [13]. Zgodnie z zapisami, koszt likwidacji jest bardzo często lekceważony w analizach skupionych na użytkowniku [18]. Dla produktów użytkowych recykling odpadów może być znaczącym kosztem w całym cyklu życia, jednak dla linii kolejowych nie ma on większego znaczenia, gdyż większość zużytych elementów nawierzchni nadaje się do prostego przetworzenia i stanowić może pełnowartościowy produkt handlowy.

Przy modernizacji linii kolejowej, przedstawionym powyżej fazom cyklu życia można przyporządkować konkretne czynności [19]. Przykładowo:

- Koncepcja i definiowanie:
- inwentaryzacja i ocena istniejącej drogi szynowej,
 - określenie parametrów eksploatacyjnych,
 - studium wykonalności,
 - opracowanie specyfikacji wykonania i odbioru robót.

Projektowanie i rozwój:

- wykonanie projektów budowlanych i wykonawczych,
- wyłonienie wykonawców.

Wytwarzanie:

- inżynieria przemysłowa,
- wytworzenie elementów składowych nawierzchni,
- prefabrykacja elementów.

Instalowanie:

- zakup gruntu,
- budowa zaplecza technicznego, szkolenia,
- transport,
- wbudowanie elementów nawierzchni na placu budowy,
- kontrola jakości wykonania robót,
- odbiory powykonawcze.

Użytkowanie i obsługiwanie:

- szkolenie personelu,
- prace prewencyjne,
- diagnostyka,
- naprawy bieżące,
- likwidacja awarii, wypadków, wykolejeń.

Likwidacja:

- rozmontowanie i usunięcie nawierzchni,
- transport,
- recykling i złomowanie,
- składowanie odpadów niebezpiecznych.

Koszty cyklu życia można zagregować do trzech głównych grup:

Według normy [6]:

$$LCC = K_{uzyskania} + K_{posiadania} + K_{likwidacji}$$

Według modelu UNIFE [18]:

$$LCC = K_{inwestycyjny} + K_{operacyjne} + K_{utrzymania}$$

Propozycja wykorzystania metod LCC

W prezentowanej pracy postanowiono przeanalizować wybrany składnik cyklu życia fragmentu linii kolejowej, jakim jest koszt cyklu życia szyn. Dla zagregowanej propozycji modelu UNIFE należy rozpatrywać przynajmniej następujące czynności:

Koszty inwestycyjne:

- zakup szyn o określonych parametrach.

Koszty operacyjne:

- montaż szyn,
- spawanie lub zgrzewanie,
- szlifowanie wstępne.

Koszty utrzymania:

- wykrywanie wad,
- szlifowanie szyn,
- napawianie,
- wymiana uszkodzonego fragmentu szyny.

W przypadku inwestycji polegającej na budowie toru łukowego, zdecydowano się na rozpatrywanie kosztu cyklu życia według metody łączącej założenia normowe i UNIFE. Zrezygnowano z obliczeń kosztu likwidacji

inwestycji, przyjmując że materiał szyn usuwany z odcinka trasy nadawać się będzie do ponownego przetworzenia lub wykorzystania w innym miejscu. Zagregowano pozycje kosztu inwestycyjnego i operacyjnego, w pozycję kosztu inwestycyjnego. Z uwagi na ciągłość eksploatacji inwestycji, nie można jednoznacznie określić długości życia za pomocą maksymalnego okresu eksploatacji poszczególnych elementów. Założono więc, że koszt cyklu życia będzie badany w okresie sześcioletniej eksploatacji po oddaniu inwestycji. Poszczególne warianty porównywać się będzie na podstawie kosztu 6 letniego cyklu życia, odniesionego do 1 metra toru.

Wymienione czynności można opisać matematycznie za pomocą następującej formuły:

$$K = K_{mww} + K_{mrrc}$$

Koszt inwestycyjny składa się z kosztów zakupu oraz wbudowania elementów nawierzchni kolejowej (w tym zakupu, montażu, spawania i wstępnego szlifowania szyn). Koszt inwestycyjny jest następnie równomiernie rozkładany na poszczególne lata eksploatacji.

W przypadku utrzymania, założono że nie będzie wykonywane napawanie szyn. Koszt utrzymania składać się będzie z prewencyjnego szlifowania oraz wymiany fragmentów szyn po przekroczeniu dopuszczalnych zużyć. Koszt można opisać następującą zależnością:

$$K_{mrrc} = K_{sz} + K_w$$

na koszt roczny składa się częstotliwość wykonywania wymian i szlifowania oraz koszt jednostkowy robót:

$$K_{sz} = n_{sz} + k_{sz}$$

$$K_w = n_w + k_w$$

częstotliwość wykonywania prac zależna jest od przeniesionego obciążenia lub szybkości przyrostu zużyć, w stosunku do wartości granicznych:

$$n_{sz} = \frac{Q}{Q_{grsz}}$$

$$n_w = \frac{z}{dz}$$

gdzie:

K_{mrrc} - roczny koszt utrzymania toru [zł/m],
 K_{sz} - roczny koszt szlifowania [zł/m],
 K_w - roczny koszt wymiany szyn [zł/m],
 n_{dz} - liczba szlifowań w ciągu roku [-],
 n_w - liczba wymian szyn w ciągu roku [-],
 k_{sz} - koszt szlifowania szyn [zł/m],
 k_w - koszt wymiany szyn [zł/m],
 Q - przeniesione obciążenie w ciągu roku [Tg],
 Q_{grsz} - obciążenie pomiędzy prewencyjnymi szlifowaniami [Tg],
 z - zużycie szyny w ciągu roku [mm],
 dz - dopuszczalne zużycie szyny [mm].

Trwałość szyn kolejowych

Przy budowie, lub przebudowie odcinka linii kolejowej, wskazane jest określenie przewidywanej trwałości wbudowanych elementów, tak aby zużycie poszczególnych części nawierzchni odbywało możliwie równomiernie. Trwałość elementu definiowana jest jako okres pomiędzy wbudowaniem a uszkodzeniem uniemożliwiającym dalszą eksploatację elementu. Można ten okres wyrazić w jednostkach czasu, cyklach pracy, bądź (jak w przypadku szyn kolejowych) w jednostkach przeniesionego obciążenia.

Dla szyn kolejowych podstawową miarą trwałości jest odporność na zużycie pionowe i boczne oraz odporność na uszkodzenia zmęczeniowe. Bardzo często analizuje się wyłączenie zmianę przekroju szyn bez uwzględniania pęknięć, złamań i zużycia falistego [15]. Jednocześnie, z uwagi na dużą nadwyżkę wskaźnika wytrzymałości w płaszczyźnie pionowej w nowych typach szyn, na łukach najczęściej rozpatruje się zużycie boczne [2].

Wartość średniej trwałości szyn z uwagi na zużycie, wyznacza się według zależności [1]:

$$z_{45^\circ} = 63386 \cdot R^{-1.5324}$$

gdzie:

T – trwałość szyn kolejowych [Tg]

dz – dopuszczalne zużycie [mm]

A – odporność szyn na zużycie [Tg/mm]

W literaturze znaleźć można dodatkowe propozycje obliczania trwałości szyn [2,4,15,16].

Czynnikami wpływającymi na zużycie szyn, czyli na trwałość nawierzchni, są procesy trybologiczne zachodzące w czasie przejazdu zestawu kołowego po odcinku toru. Podczas ruchu, występuje stały nacisk obręczy koła na powierzchnię toczną główki szyny, poślizgi wiertne wywołane toczeniem się koła o profilu stożkowym po szynie oraz poślizgi suche pomiędzy obrzeżem koła a powierzchnią boczną główki szyny [11]. Nacisk obrzeża na szynę zależy przede wszystkim od parametrów geometrycznych odcinka linii kolejowej, takich jak promień łuku, prędkość przejazdu, przechyłka i szerokość toru. Dodatkowe obciążenia w obu płaszczyznach pochodzą od nierówności geometrycznych toru oraz związane są z niekorzystnymi charakterystykami poszczególnych pojazdów kolejowych.

Metodami zwiększania trwałości szyn, są:

- modyfikacja twardości szyny,
- zmiana układu geometrycznego,
- smarowanie powierzchni bocznych szyn,
- zmiana dopuszczalnych granic zużycia bocznego [2,3]

Przykład zastosowania metody

Zgodnie z polskimi przepisami [12], w łukach o promieniu mniejszym niż 600 metrów, w celu uniknięcia nadmiernego przyrostu zużyć,

należy stosować szyny o większej twardości. Na odcinkach prostych stosuje się szyny typowe R260, w przypadku łuków zalecane jest stosowanie szyn utwardzanych cieplnie R350HT. W analizie zużyć oparto się na modelach:

- zużycie 45° szyn w łuku według INNOTRACK [7],
- zużycie pionowe według funkcji obciążenia granicznego szyn na prostej według polskich przepisów [12].

Model zużycia szyn UNIFE zakłada funkcyjne powiązanie promienia łuku poziomego z wielkością zużycia 45° po przeniesieniu obciążenia 100 Tg. Dla szyny R260 podano zależność:

$$z_{45^\circ} = 3703,5 \cdot R^{-1.1551}$$

Z uwagi na stosowanie w Polsce szyn R350HT, które nie były badane przez INNOTRACK, przyjęto zależność podaną dla najbliższej twardości szyny R370CrHT:

$$n_{wp} = \max\left(\frac{Q}{Q_{grp}}, 1\right)$$

Wartość dopuszczalnego zużycia 45° wynosi 24 mm, po przekroczeniu tej wartości szynę należy wymienić.

W przypadku obciążenia granicznego, model zakłada określenie maksymalnego obciążenia jakie może być przeniesione przez dany typ szyny, po którym szyna musi zostać wymieniona. Dla szyn R260 obciążenie graniczne wynosi 600 Tg, a dla R350HT przyjęto wartość 1200 Tg. Jednocześnie szyny powinny być wymieniane nie rzadziej niż co 20 lat dla szyn R260 i co 40 lat dla szyn R350HT, przy założeniu obciążenia rocznego 30 Tg [8].

W przypadku szyn w łuku, wymiana nie powinna być przeprowadzana rzadziej niż na odcinku prostym. Roczną częstotliwość wymian dla obu typów szyn opisano funkcjami:

$$n_{wt} = \max\left(\frac{z_{45^\circ} \cdot Q}{dz_{45^\circ} \cdot 100Tg} \cdot \frac{Q}{Q_{grp}}, 1\right)$$

gdzie:

z_{45° - wartość zużycia 45° po przeniesieniu obciążenia 100 Tg [mm],

dz_{45° - dopuszczalne zużycie 45° szyny [mm],

R - promień łuku poziomego [m],

n_{wp} - częstotliwość wymian szyn na prostej [1/rok],

n_{wt} - częstotliwość wymian szyn na łuku [1/rok],

Q - przeniesione obciążenie w ciągu roku [Tg/rok],

Q_{grp} - graniczne obciążenie szyn między wymianami [Tg],

t - maksymalny czas eksploatacji szyny [rok].

Założono analizę miejsca zmiany kierunku trasy kolejowej o zadany kąt zwrotu. Następnie wykonano obliczenia dla typowego, symetrycznego układu geometrycznego. Obliczenia powtórzone dla promieni łuku od 200 do 4000 metrów. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch przypadków: szyny R350HT na od-

cinku łukowym oraz szyny R260 na prostej, oraz szyny R260 na całej długości odcinka. Zasięg odcinków prostych określono na taki, że przy największym analizowanym promieniu łuku, długość prostych wynosiła 0. Zgodnie z interpretacją wewnętrznych przepisów PKP PLK, na zewnętrznym toku krzywej przejściowej należy zmienić rodzaj szyny w miejscu w którym krzywizna przekracza wartość 1/800 m. Z uwagi na warunki początkowe porównania, stwierdzono że analityczne obliczenia układu z krzywymi przejściowymi nie spowodują znaczącej zmiany w uzyskanym wyniku, za to spowoduje znaczące zwiększenie rozpatrywanych wariantów (przynajmniej o rząd wielkości). Na zakończenie obliczono roczny koszt życia inwestycji przeliczony na 1 metr toru.

Obliczenia wykonano dla silnie obciążonej linii kolejowej (30 Tg/rok), przy założeniu następujących kosztów jednostkowych (tab. 1). Fragment obliczeń pokazano w tabeli 2.

Na rysunku 1 pokazano pełen zakres obliczeń z uwzględnieniem kosztu inwestycyjnego w sześcioletnim okresie eksploatacji. Wyraźnie widać, że do promienia o wartości około 1500 m opłacalne jest stosowanie szyny utwardzanych cieplnie R350HT.

Wnioski

Badanie kosztów cyklu życia inwestycji i optymalizacja projektu pod kątem zmniejszenia kosztów ponoszonych w czasie eksploatacji, mogą zapewnić znaczące oszczędności dla zarządcy infrastruktury.

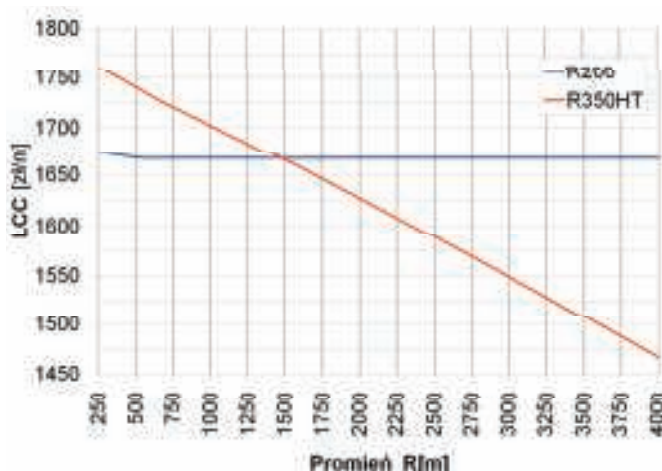
Oszczędności mogą być przedstawione w formie wskaźników ekonomicznych, wyrażanych w formie finansowej, bądź analiz związanych z niezawodnością i pewnością działania. Mniejsza przewidywana ilość awarii

Tab. 1. Przyjęte w obliczeniach koszty jednostkowe

| Działanie | Koszt dla szyny R260 | Koszt dla szyny R350HT |
|------------------------------|----------------------|------------------------|
| Ułożenie 1 m toru bezстыkowy | 1178,63 zł | 1286,63 zł |
| Wymiana 1 m szyny | 186 zł | 240 zł |
| Szlifowanie 1 m szyny | 36 zł | 36 zł |

Tab. 2. Obliczenia kosztu cyklu życia inwestycji

| R[m] | Długość łuku [m] | Długość prosta [m] | R350HT | | R260 | | Utrzymanie zł/m | LCC zł/m |
|------|------------------|--------------------|------------|---------------|------------|---------------|-----------------|----------|
| | | | łuk | | prosta | | | |
| | | | Wymian/rok | Szlifowań/rok | Wymian/rok | Szlifowań/rok | | |
| 200 | 200 | 4151.90 | 0.10 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 79.79 | 1765.36 |
| 250 | 250 | 4097.27 | 0.08 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 79.09 | 1761.17 |
| 300 | 300 | 4042.64 | 0.06 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 78.40 | 1757.02 |
| 350 | 350 | 3988.01 | 0.05 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 77.71 | 1752.88 |
| 400 | 400 | 3933.38 | 0.05 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 77.02 | 1748.77 |
| 450 | 450 | 3878.75 | 0.04 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 76.34 | 1744.66 |
| 500 | 500 | 3824.12 | 0.04 | 0.67 | 0.05 | 2.00 | 75.65 | 1740.55 |



1. Porównanie kosztu cyklu życia LCC

i związanych z nimi niezbędnych zamknięć naprawczych, może przyczynić się do poprawy wizerunku kolei. Przeprowadzone analizy dotyczące kosztu cyklu życia szyn kolejowych wskazują, że obowiązujące obecnie wytyczne określają zakres stosowalności szyn utwardzanych wężej, niż jest to rzeczywiście opłacalne. Na liniach średnio i mocno obciążonych opłacalnym jest (w kontekście LCC) stosowanie szyn utwardzanych cieplnie w łukach o promieniach mniejszych niż 1500 m. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: Trwałość i niezawodność eksploatacyjna nawierzchni kolejowej, WKiŁ Warszawa 1980.
- [2] Bałuch H.: Wybrane zagadnienia trwałości i niezawodności szyn, III ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna Spawalnictwo Dróg Szynowych oraz Materiały, Wykonawstwo, Odbiory, Warszawa-Bochnia 2007.
- [3] Bałuch M.: Analiza kryteriów dopuszczalnego bocznego zużycia szyn. Drogi Kolejowe nr 10/11, 1978.
- [4] Bałuch M.: Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2005.
- [5] Borghagen L., Brinkhagen L.: LCC Procurement at the Swedish State Railways,

- [6] Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, 1984.
- [7] EN 60300-3: Dependability management. Part 3: Application guide
- [8] INNOTRACK Integrated Project (IP) Thematic Priority 6: Sustainable Development, Global Change and Ecosystems D4.1.4 Rail Degradation Algorithms, 2006.
- [9] INNOTRACK Guideline, Definitive guidelines on the use of different rail grades, Deliverable report D4.1.5GL, 2006.
- [10] Kjellsson U., Hagemann O.: UNIFE-UNILIFE and UNIFE_UNIDATA - the first European Life Cycle Cost interface software model, Reseach Report 2000, UNIFE: Guidelines for Life Cycle Cost, Volume II Terms and Definitions for Total Railway Systems, 2001.
- [11] Kjellsson U.: From X2000 to Crusaris Regina: Development of LCC technology, World Congress on Railroad Research, 1993.
- [12] Madej J.: Teoria ruchu pojazdów szynowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012
- [13] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.: Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1, Warszawa 2005.
- [14] Ruman F., Grenčík J.: LCC and LCP analysis of rail vehicles, Logistyka 3/2014
- [15] Stern J.: Life cycle cost: A method for reducing costs and improving railway vehicles, World Congress on Railroad Research, 1993.
- [16] Sysak J.: Drogi Kolejowe, PWN Warszawa 1986
- [17] Šachunjanec G. N.: O srokach służby relsov. Put' i Putevoe Chozajstvo nr 10/1971
- [18] Tułeczki A.: Life cycle cost (LCC) miarą efektywności pojazdów szynowych, Przegląd Kolejowy, 6, 1999.
- [19] UNIFE: Guidelines for Life Cycle Cost volume II: Terms and Definitions for Total Railway Systems, 2001
- [20] Wełnic P.: Szacowanie kosztu cyklu życia według Polskiej Normy PN-EN 60300-3-3, TTS 6/2009