

## Uwarunkowania dla jazdy tego samego zestawu kołowego po torze kolejowym i tramwajowym (2)

W artykule dokonano wszechstronnej analizy technicznej problemów, jakie napotkałby ten sam zestaw kołowy podczas jazdy pojazdu zarówno po torach kolejowych jak i po torach tramwajowych w Polsce. Wykazano, że przy określonych uwarunkowaniach taka jazda jest możliwa, co oznacza realność zbudowania pojazdu tramwajowo-kolejowego.

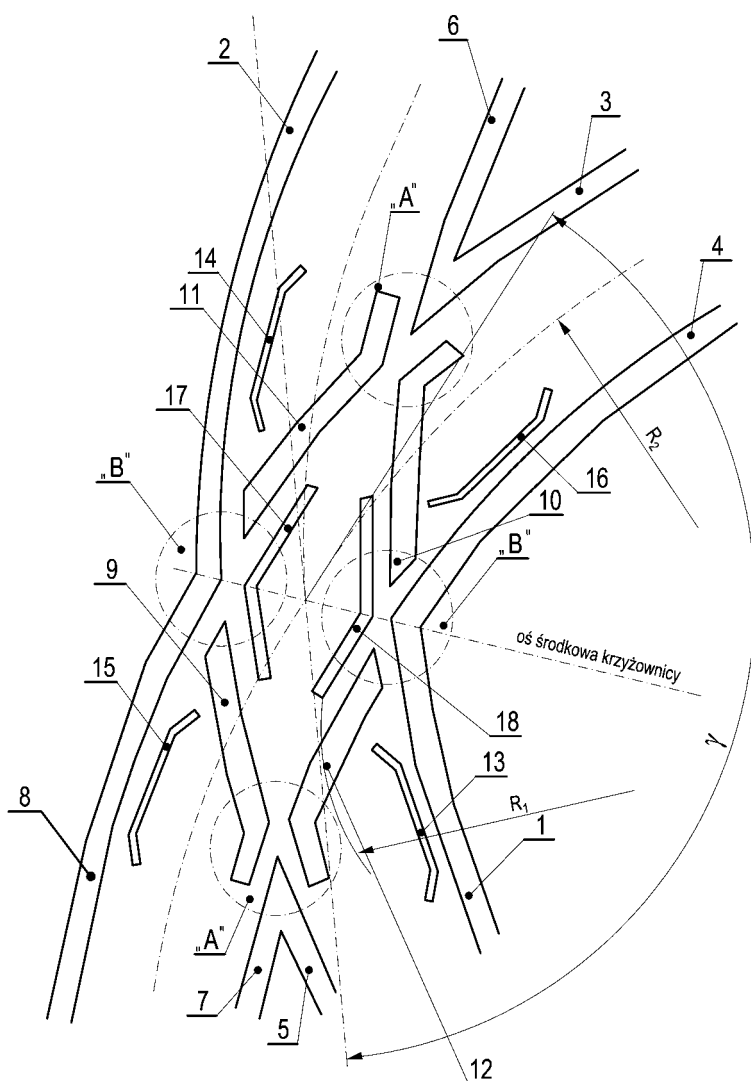
Artykuł stanowi drugą (i ostatnią) część publikacji [16] i jest jej dalszym ciągiem.

### 5. JAZDA PO KRZYŻOWNICACH ROZWARTOKĄTNYCH

Krzyżownice rozwartokątne występują powszechnie w głowicach rozjazdowych stacji kolejowych, w tzw. rozjazdach angielskich i taki rozjazd składa się z krzyżownicy i czterech zwrotnic.

### 5.1. Budowa kolejowej krzyżownicy rozwartokątnej

Kolejowa krzyżownica rozwartokątna jest przedstawiona schematycznie na rys. 18.



- „A” - serce ostrokątne krzyżownicy kolejowej
- „B” - serce rozwartokątne krzyżownicy kolejowej
- $\gamma$  - kąt rozwarty krzyżownicy
- 1 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 2 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 3 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 4 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 5 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 6 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 7 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 8 - szyna zewnętrzna krzyżownicy
- 9 - szyna wewnętrzna krzyżownicy
- 10 - szyna wewnętrzna krzyżownicy
- 11 - szyna wewnętrzna krzyżownicy
- 12 - szyna wewnętrzna krzyżownicy
- 13 - kierownica serca ostrokątnego
- 14 - kierownica serca ostrokątnego
- 15 - kierownica serca ostrokątnego
- 16 - kierownica serca ostrokątnego
- 17 - kierownica serca rozwartokątnego
- 18 - kierownica serca rozwartokątnego

Rys. 18. Schemat kolejowej krzyżownicy rozwartokątnej

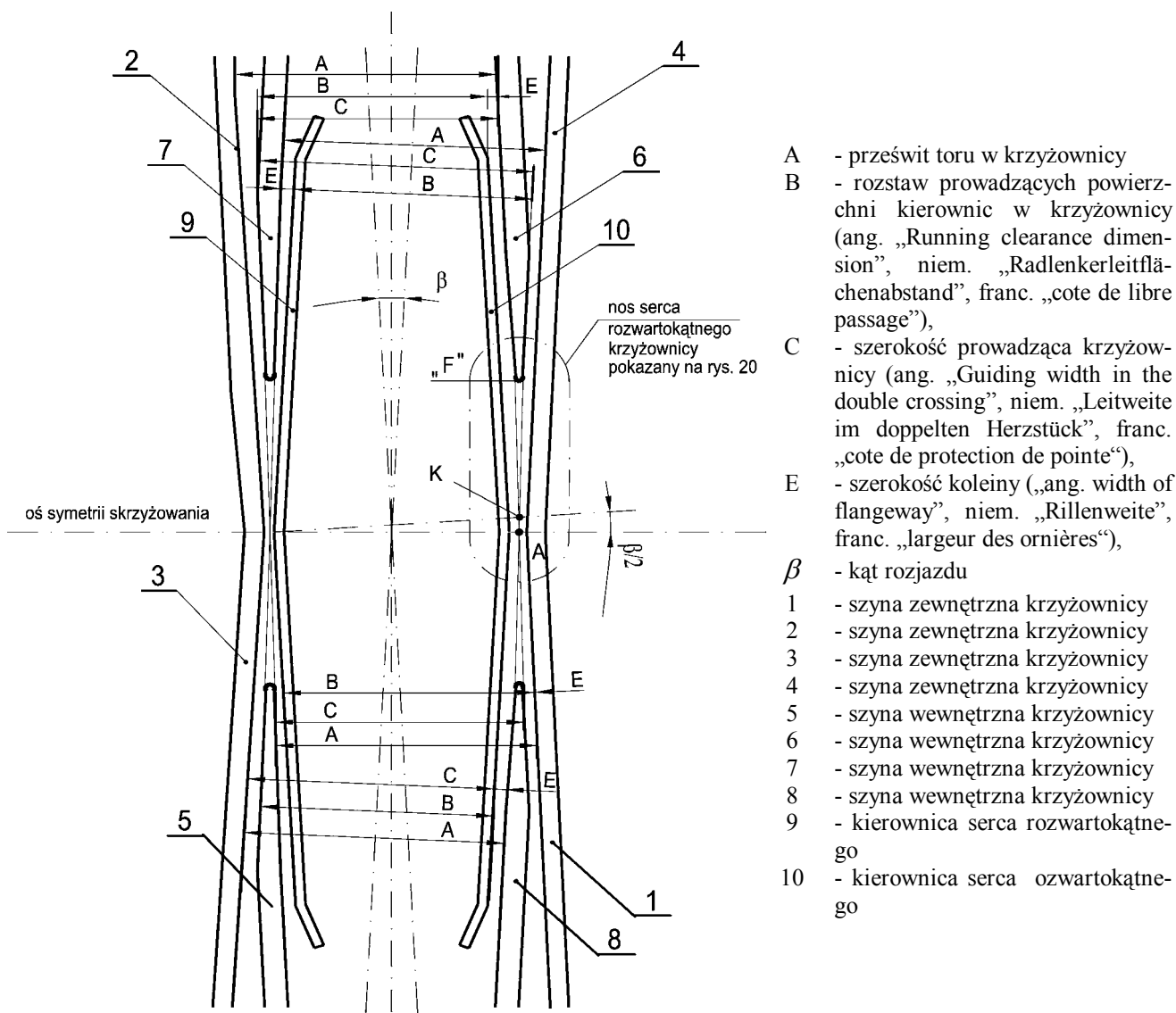
Z rys. 18 widać, że w obrębie krzyżownicy znajdują się dwa serca ostrokątne („A”) oraz dwa serca rozwartokątne („B”). W sercu ostrokątym krzyżownicy jedynie obrzeże jednego koła danego zestawu kołowego przejeżdżającego przez tę krzyżownicę czy zwrotnicę doznaje utraty prowadzenia bocznego przez szynę, po której koło to biegnie. Drugie koło tego zestawu kołowego jest w tym samym czasie prowadzone przez kierownicę serca ostrokątnego, co w pełni kompensuje brak bocznego prowadzenia obrzeża pierwszego z tych kół.

Dla odmiany oba serca rozwartokątne krzyżownicy występują jednocześnie, tworząc tak zwane „podwójne serce krzyżownicy” (ang. „double crossing”, niem. „doppeltes Herzstück”). Jest to taki odcinek przejeżdżany przez zestaw kołowy,

na długości którego obrzeża obu kół tego zestawu jednocześnie mogą utracić prowadzenie boczne z jednej strony (np. z prawej). Dlatego dla zapewnienia bezpieczeństwa jazdy zestawu kołowego przez krzyżownice marodajnym jest przejazd przez serca rozwartokątne krzyżownicy.

Im mniejszy jest promień  $R_1$  i/albo  $R_2$  oraz/albo im większy jest kąt  $\gamma$  w sercach rozwartokątnych krzyżownicy, tym gorsze są warunki przejazdu przez krzyżownicę. W myśl przepisów UIC [6] ustalono następujące wymagania dla serc rozwartokątnych:  $R_1 \geq 450$  m;  $R_2 \geq 450$  m;  $\text{tg } \gamma \geq -\frac{1}{9}$  czyli  $\gamma \leq 173^{\circ}40'$ .

Serca rozwartokątne są przedstawione na rys. 19.



Rys.19. Schemat wymiarowy krzyżownicy rozwartokątnej

Według wymagań karty UIC 510-2 [6] wymiary serc rozwartokątnych krzyżownicy są następujące (promienie  $R_1 \geq 450$  m i  $R_2 \geq 450$  m można pominąć, traktując oba tory w krzyżownicy jako proste):

- Prześwit toru  $A = 1435$  mm. Tolerancja konstrukcyjna tego wymiaru w krzyżownicach wynosi  $A = 1435 \pm 1$  mm podczas gdy na zwykłym torze prostym tolerancja ta wynosi  $1435 \pm 2$  (tolerancja konstrukcyjna dla przedsiębiorstw budowy torów) Tolerancja eksploatacyjna tego wymiaru w krzyżownicach wynosi  $A = 1435_{-2}^{+4}$  mm podczas gdy na zwykłym torze prostym tolerancja eksploatacyjna tego wymiaru wynosi  $A = 1435_{-3}^{+10}$  mm
- Rozstaw prowadzących powierzchni kierownic w krzyżownicy  $B = 1355$  mm. Górna odchyłka konstrukcyjna tego wymiaru wynosi  $+1$  mm, a dolnej odchyłki nie ogranicza się

w ogóle, wobec czego tolerancja konstrukcyjna tego wymiaru jest określona nierównością  $B \leq 1356$  mm

Tolerancja eksploatacyjna tego wymiaru jest określona tą samą nierównością  $B \leq 1356$  mm.

- Szerokość prowadząca krzyżownicy  $C = 1395$  mm. Tolerancja konstrukcyjna tego wymiaru wynosi  $C = 1395 \pm 0,5$  mm

Tolerancja eksploatacyjna tego wymiaru wynosi  $C = 1395_{-2}^{+3}$  mm

- Szerokość koleiny dla obrzeża koła  $E = 40$  mm. Tolerancja konstrukcyjna tego wymiaru wynosi  $E = 40 \pm 0,5$  mm

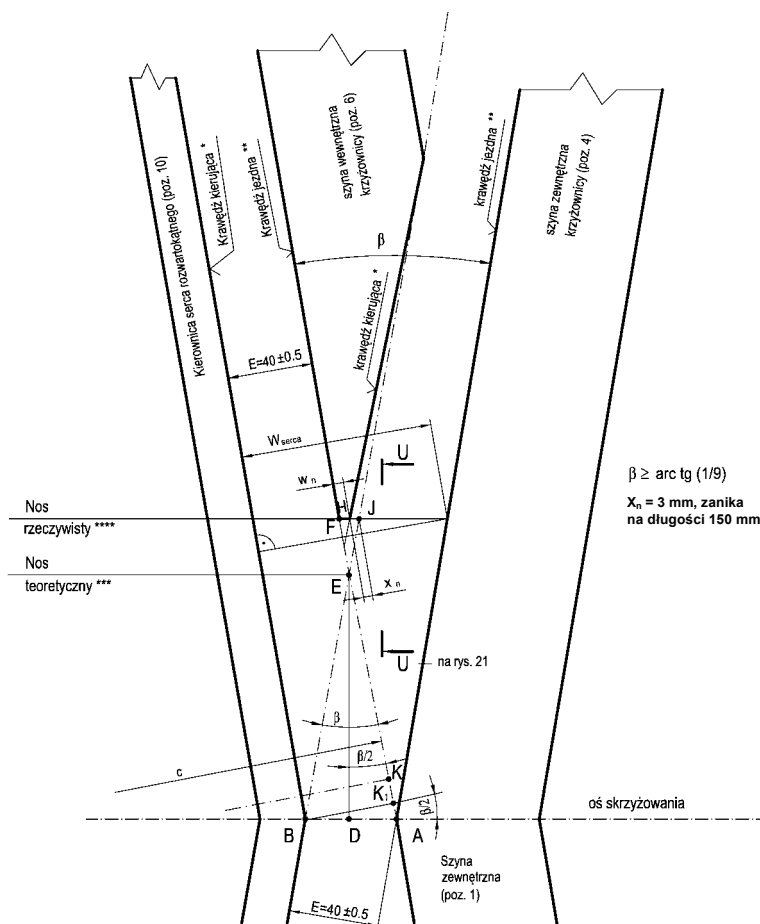
Tolerancja eksploatacyjna tego wymiaru nie jest określona liczbowo, a jedynie wymaga się, aby  $E$  nie zmieniło się w procesie eksploatacji więcej niż do takiej wartości liczbowej, przy której tolerancje eksploatacyjne wymiarów  $A$ ,  $B$  i  $C$  będą jeszcze dotrzymane [6].

Wszystkie powyższe wymiary mają być mierzone na poziomie położonym 14 mm poniżej płaszczyzny główek szyn, czyli na tym samym poziomie, na którym dokonuje się pomiaru prześwitu toru prostego (1435 mm).

Według karty UIC 510-2 [6] nos serca rozwartokątnego krzyżownicy ma wymiary pokazane na rys. 20 i 21.

Tolerancja konstrukcyjna wymiaru  $H$  wynosi  $H_{-1}^{+2}$  mm, a tolerancja eksploatacyjna tego wymiaru  $H_{-1}^{+10}$  mm [6].

Tolerancje eksploatacyjne dla poszczególnego rodzaju rozjazdu podane są w [15].



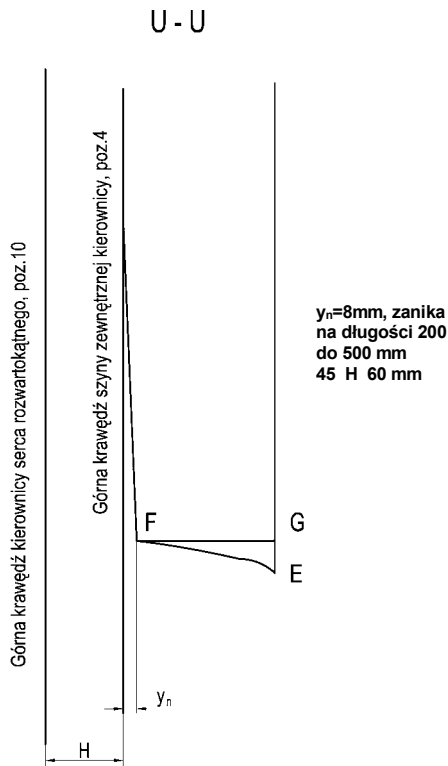
ang.	niem.	franc.
* „guiding edge”,	„Leitkante”,	„flanc de guidage”
** „ride edge”,	„Fahrkante”,	„file directrice”
*** „mathematical nose”,	„mathematische Herzstückspitze”,	„pointe mathématique”
**** „real nose”,	„tatsächliche Herzstückspitze”,	„pointe réelle”

## 5.2. Długość luki bez prowadzenia zestawu kołowego

### 5.2.1. Długość luki w skrzyżowaniu kiedy zestaw kołowy nie jest prowadzony przez powierzchnię boczną szyny zewnętrznej.

Przebieg przejazdu zestawu kołowego przez serca rozwartokątne w krzyżownicy jest następujący. Niech rozpatrywany zestaw kołowy przejeżdża wzdłuż toru prowadzącego z prawego dolnego narożnika rysunku 19 do lewego górnego narożnika tego rysunku.

Rys. 20. Nos serca rozwartokątnego krzyżownicy (szczegóły „F” z rys. 19)



Rys. 21. Przekrój U-U z rys.20

Na odcinku AF (rys.20) obrzeża prawego koła tego zestawu nie jest prowadzone prawostronnie przez bok szyny (poz. 4). Odcinek AF (rys.20) składa się z odcinków AE i EF, przy czym długość odcinka AE zwana teoretyczną luką w sercu krzyżownicy (niem. „theoretische Herzstücklücke”, ang. „mathematical gap”) jest sumą odcinków  $AK_1 + K_1E$  i wynosi:

$$l_{AE} = E \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{E}{\operatorname{tg} \beta} = E \cdot \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{\operatorname{tg} \beta} \approx \frac{E}{\operatorname{tg} \beta} \quad (12)$$

ponieważ  $\beta$  jest kątem małym.

Zatem:

$$l_{AE} \approx \frac{E}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{40}{\frac{1}{9}} = 360 \text{ mm}$$

Nos serca rozwartokątnego krzyżownicy nie może być ostry; jego czoło musi mieć pewną szerokość  $w_n$  nie mniejszą niż 2 mm, co wraz z wymiarem  $x_n = 3$  mm (rys.20) daje

$$l_{FJ} = w_n + x_n = 2 + 3 = 5 \text{ mm}$$

Długość odcinka EF z rys.20 wynosi:

$$l_{EF} = \frac{l_{FJ}}{2 \cdot \sin \frac{\beta}{2}} = \frac{l_{FJ}}{2} \cdot \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}}}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \approx \frac{l_{FJ}}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \quad (13)$$

czyli

$$l_{EF} = \frac{5}{2 \cdot \frac{1}{18}} = 45 \text{ mm}$$

Faktyczna luka nieprowadząca w krzyżownicy, czyli faktyczna długość odcinka, na którym powierzchnia boczna główki szyny (poz.4) w krzyżownicy nie prowadzi obrzeża koła zestawu kołowego prawostronnie, wynosi:

$$l_{AF} = l_{AE} + l_{EF} \quad (14)$$

czyli

$$l_{AF} = 360 + 45 = 405 \text{ mm}$$

Zużywanie się szyn praktycznie nie zmienia długości odcinka  $l_{AF}$ .

### 5.2.2. Długość tej części odcinka, na której kierownica kompensuje brak prowadzenia przez bok szyny

Na długości odcinka AK przedstawionego na rysunku 19 rolę prawostronnego prowadzenia bocznego zestawu kołowego pełni lewa kierownica krzyżownicy pozycja 9.

Długość odcinka AK z rys.19 wynosi:

$$l_{AK} = C \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \quad (15)$$

czyli

$$l_{AK} = 1395 \cdot \frac{1}{18} = 77,5 \text{ mm}$$

W wyniku zużycia, gdy wymiar C osiągnie najmniejszą dopuszczalną wartość  $C_{\min} = 1393$  mm,  $l_{AK}$  wyniesie:

$$l_{AK \min} = C \cdot \frac{1}{18} = 1393 \cdot \frac{1}{18} = 77,4 \text{ mm}$$

Praktycznie nie ma różnicy pomiędzy  $l_{AK}$  a  $l_{AK \min}$ , wobec czego przyjęto jednolitą wartość  $l_{AK} = 77,5$  mm.

### 5.2.3. Długość rzeczywistej luki w skrzyżowaniu kiedy zestaw kołowy nie jest prowadzony ani prawostronnie przez bok prawej szyny ani lewostronnie przez kierownicę

Z rys.20 i 21 wynika, że szukaną wielkością jest odcinek FK, którego długość wynosi:

$$l_{FK} = l_{AF} - l_{AK} \quad (16)$$

czyli

$$l_{FK} = 405 - 77,5 = 327,5 \text{ mm}$$

Gdyby średnica kół zestawu kołowego była bliska zeru, to zestaw ten nie byłby prowadzony poprzecznie prawostronnie na długości drogi równej 327,5 mm.

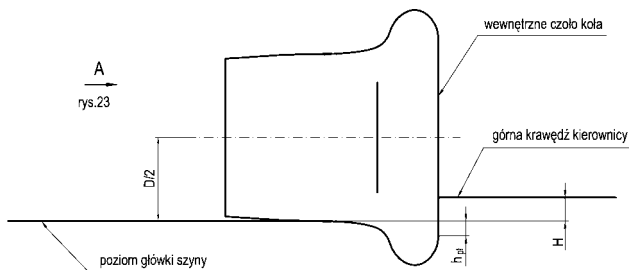
Jednak średnica koła jest znacznie większa od zera i na pewnych częściach tej długości zestaw kołowy jest prowadzony prawostronnie przez kierownicę 9 lewego serca krzyżownicy z tego względu, że dla koła

o skończonej wartości średnicy  $D$  znacznie większej od zera również cięciwa koła wierzchołkowego ma skończoną wartość długości większą od zera.

### 5.3. Długość drogi przebytej przez środek lewego koła

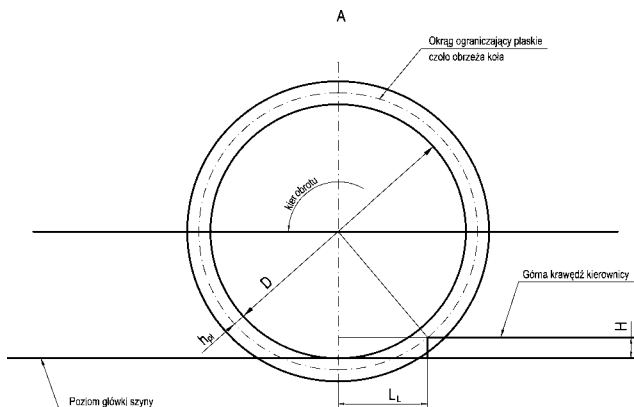
Przeanalizowano ruch lewego koła, gdy zestaw kołowy jest prowadzony przez lewą kierownicę krzyżownicy od chwili, gdy punkt styku bieżni koła z szyną znajdował się w miejscu załamania lewej kierownicy serca rozwartokątnego (poz.9 z rys.19) do chwili, gdy płaskie czoło tego koła wyjdzie poza kontur kierownicy.

Sytuację pokazano na rys.22 i 23.



$h_{pl}$  – wysokość płaskiego wewnętrznego czoła obrzeża

Rys. 22. Współpraca lewego koła z lewą kierownicą serca rozwartokątnego



Rys. 23. Widok „A” z rys. 22

W chwili przedstawionej na rys.23 lewe koło traci prowadzenie przez lewą kierownicę krzyżownicy (poz.9 na rys.19) i może zacząć skręcać w prawo w tor utworzony z szyn, poz.4 i 7.

Zachodzi zależność:

$$L_L = \sqrt{\left(\frac{D}{2} + h_{pl}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - H\right)^2} = \sqrt{D \cdot (H + h_{pl}) \cdot \left(1 - \frac{H - h_{pl}}{D}\right)}$$

Wyrażenie

$$\frac{H - h_{pl}}{D}$$

jest bardzo małe w zestawieniu z jedynką i można je pominąć.

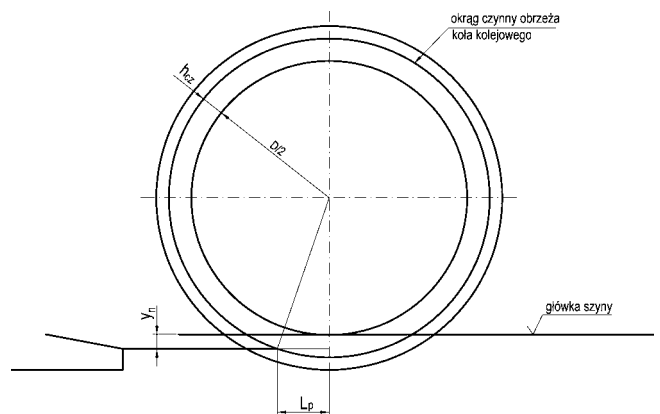
Zatem

$$L_L \approx \sqrt{D \cdot (H + h_{pl})} \quad (17)$$

Według [6] dla klasycznych kół kolejowych najmniejsza  $D$  wynosi 840 mm, najmniejsza wysokość kierownicy nad poziomem główek szyn  $H = 45$  mm oraz wysokość płaskiego czoła obrzeża koła  $h_{pl} = 10$  mm. Zatem z wzoru (17) otrzyma się

$$L_L = \sqrt{D \cdot (H + h_{pl})} = \sqrt{840 \cdot (45 + 10)} = 214,94 \approx 215 \text{ mm}$$

W przedstawionej chwili cięciwa okręgu czynnego obrzeża prawego koła na poziomie obniżonego nosa prawego serca krzyżownicy będzie oddalona od pionowej płaszczyzny symetrii zestawu kołowego o wielkość  $L_p$ , którą wyznaczono poniżej, a sytuację przedstawia rys.24.



Rys. 24. Usytuowanie prawego koła w luce serca rozwartokątnego

Połowa cięciwy wynosi:

$$L_p = \sqrt{\left(\frac{D}{2} + h_{cz}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} + y_n\right)^2} = \sqrt{D \cdot (h_{cz} - y_n) \cdot \left[1 - \frac{h_{cz} + y_n}{D}\right]}$$

Wyrażenie

$$\frac{h_{cz} + y_n}{D}$$

jest bardzo małe w zestawieniu z jedynką i można je pominąć.

Zatem

$$L_p \approx \sqrt{D \cdot (h_{cz} - y_n)} \quad (18)$$

Według [6] czynna wysokość obrzeża  $h_{cz} = 26$  mm a obniżenie nosa serca  $y_n = 8$  mm.

Zatem wg zależności (18):

$$L_P = \sqrt{840 \cdot (26 - 8)} = 122,96 \approx 123 \text{ mm}$$

Suma odległości  $L_L + L_P$  wynosi

$$L_L + L_P = 215 + 123 = 338 \text{ mm}$$

co stanowi więcej niż  $l_{FK} = 327,5 \text{ mm}$ .

Zatem w przypadku zestawu kołowego o średnicy 840 mm lub większej, zanim jego lewe koło utraci prawostronne prowadzenie boczne realizowane przez lewą kierownicę krzyżownicy rozwartokątnej, już jego prawe koło swoją cięciwą okręgu czynnej wysokości obrzeża przejdzie poza nos prawego serca krzyżownicy, czyli uzyska prawostronne prowadzenie boczne realizowane przez prawą szynę toru.

Największa wartość wymiaru  $(a_{kol} + b_{kol})_{max} = 1396 \text{ mm}$  podczas gdy najmniejsza szerokość prowadząca krzyżownicy wynosi  $C_{min} = 1393 \text{ mm}$ .

Na okręgu czynnej wysokości obrzeża koła wymiar  $(a_{kol} + b_{kol})_{max}$  jest mniejszy o 8 mm od wartości 1396 mm [6].

Zatem  $(a_{kol} + b_{kol})_{rob} = 1396 - 8 = 1388 \text{ mm}$ , wobec czego obrzeże prawego koła wchodzi obok nosa prawego serca krzyżownicy z luzem 5 mm. Gdy nos osiąga pełną wysokość, tak że krąg tocny koła prawego zetknie się z jego bieżnią, wówczas wymiar  $(a_{kol} + b_{kol})_{max}$  osiąga swą pełną wartość 1396 mm, co jest większe o 3 mm od najmniejszej szerokości prowadzącej krzyżownicy  $C_{min}$ . Wtedy droga odepchnięcia zestawu kołowego w bok wyniesie 3 mm, co jest w zupełności dopuszczalne.

#### 5.4. Wymiary kół o małych średnicach

Z dotychczasowych obliczeń wynika, że jedynie zestawy kołowe o średnicy toczonej  $D \geq 840 \text{ mm}$  mają zapewnione stuprocentowe bezpieczeństwo przed wykolejeniem podczas przejazdu przez serce rozwartokątne w krzyżownicy i z tego względu do połowy dwudziestego stulecia wszystkie pojazdy kolejowe, za wyjątkiem drugorzędnych pojazdów gospodarczych, miały koła o średnicy toczonej  $D \geq 840 \text{ mm}$ .

W połowie dwudziestego stulecia nastąpiła zmiana poglądów na omawiany temat, a powodem tego było wprowadzenie w życie w USA nowej koncepcji transportu towarowego znanej pod symbolem TOFC (trailers on flat cars = naczepy samochodowe na platformach kolejowych).

W Europie zaczęto próbować naśladować tę intermodalną komunikację, ale natknięto się na poważny problem w postaci niskiej skrajni taboru i skrajni budowli, które uniemożliwiały przewóz naczep na typowych platformach.

Dla pokonania tych problemów zastosowano naraz dwa sposoby: zagłębienia w podłogach specjalnych platform kolejowych na koła samochodowe (wagon kieszeniowy), oraz koła o bardzo małej średnicy  $D \geq 330 \text{ mm}$ .

Wymagało to jednak zapewnienia zestawom kołowym o małej średnicy toczonej bezpiecznej jazdy po torach kolejowych.

W tym celu zwiększono wysokość obrzeży kół, przyjmując ją równą  $32^{+4} \text{ mm}$  zamiast wartości stosowanej dla kół normalnych równej  $28^{+8} \text{ mm}$ . Zatem dla małych kół czynna wysokość obrzeża wyniesie

$$h_{rob\ mk} = 32^{+4} - 2 = 30^{+4} \text{ mm}$$

Dalej postanowiono, że dla małych kół wymiar szerokości prowadnej zestawu kołowego nigdy nie może być mniejszy niż  $d_{min\ mk} = 1415 \text{ mm}$ . Zatem najmniejsza grubość obrzeża małego koła wynosi:

$$b_{min} = \frac{d_{min} - a_{max}}{2} = \frac{1415 - 1360^{+2}}{2} = 26,5 \text{ mm}$$

Przyjęto również postanowienie, że dla małych kół nie dopuszcza się niejednakowego zużywania się obrzeży obu kół zestawu kołowego. Zatem tolerancja eksploatacyjna wymiaru  $b$  wyniesie:

$$b = 32,5_{-5}^{+0,5} \text{ mm}$$

Postanowiono też, że tolerancja eksploatacyjna wymiaru szerokości wieńca koła wyniesie

$$f = 135_{-2}^{+5} \text{ mm} \text{ (wraz z rozwalcowaniami eksploatacyjnymi).}$$

#### Przejazd zestawu kołowego z kołami o średnicy 330 mm przez krzyżownicę

Dla małego koła półcięciwa okręgu płaszczyzny czołowej lewego koła wynosi z wzoru (17)

$$L_L = \sqrt{D_{mk} \cdot (H + h_{pl})} = \sqrt{330 \cdot (45 + 10)} = 134,72 \approx 135 \text{ mm}$$

Dla tego koła półcięciwa okręgu czynnej wysokości obrzeża prawego koła wynosi z wzoru (18)

$$L_P = \sqrt{D_{mk} \cdot (h_{czmk} - y_n)} = \sqrt{330 \cdot (30 - 8)} = 85,20 \approx 85 \text{ mm}$$

Suma półcięciw  $L_L$  i  $L_P$  dla małego koła wynosi 220 mm.

Jest to mniej niż długość rzeczywistej luki w sercu krzyżownicy obliczonej wzorem (16)  $l_{FK} = 327,5 \text{ mm}$ .

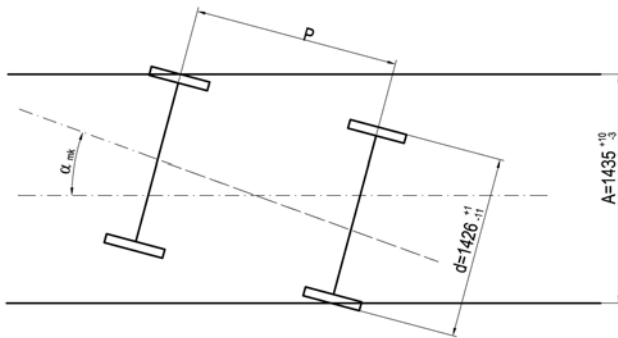
Długość odcinka w prawym sercu krzyżownicy, na której zestaw kołowy w ogóle nie jest prowadzony prawostronnie, wynosi:

$$L_N = l_{FK} - (L_L + L_P) = 327,5 - 220 = 107,5 \text{ mm}$$

Na odcinku  $L_N$  zestaw kołowy może usiłować skrócić w nieprawidłowe koleiny serc krzyżownicy i o ile zaistniałby taki przypadek, to natychmiast nastąpiłoby wykolejenie pojazdu, w którym zestaw ten byłby zabudowany.

Gdyby zestaw kołowy wjeżdżał w krzyżownicę w taki sposób, że podłużna oś symetrii wózka pojazdu pokrywałaby się z podłużną osią symetrii toru, to byłaby jakaś szansa na to, aby w krzyżownicy zestaw ten biegł równoległe do kierownicy lewego serca w krzyżownicy. Ale to na ogół nie zdarza się. Przeważnie

wózki wężykują, a wtedy przy największej amplitudzie wężykowania podłużna oś symetrii wózka jest odchylona od podłużnej osi symetrii toru o pewien kąt  $\alpha$ , zwany kątem natarcia. W torze prostym kąt natarcia pokazano na rys. 25.



Rys. 25. Kąt natarcia wózka na torze prostym

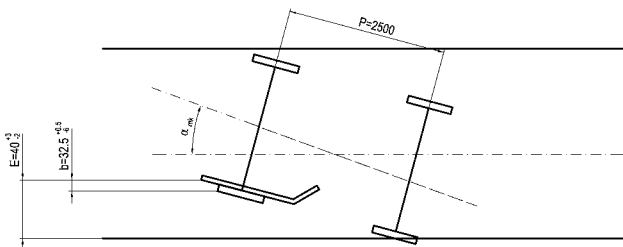
Kąt natarcia wynosi:

$$\operatorname{tg} \alpha_{mk} = \frac{A-d}{p} = \frac{1445-1415}{2500} = 0,012 \quad \text{i}$$

$$\alpha_{mk} = 0^{\circ} 41' 20''$$

Baza w kolejowym wózku osobowym wynosi  $p = 2500$  mm.

Gdy wózek jest prowadzony przez kierownicę krzyżownicy to sytuacja jest inna i kąt natarcia pokazano na rys.26.



Rys. 26. Kąt natarcia wózka na lewą kierownicę krzyżownicy rozwartokątnej

Kąt natarcia

$$\operatorname{tg} \alpha_{mk} = \frac{E_{\max} - b_{\min}}{p} = \frac{43 - 26,5}{2500} = 0,0066 \quad \text{i}$$

$$\alpha_{mk} = 0^{\circ} 22' 50''$$

Wtedy po utracie prawostronnego prowadzenia bocznego zestaw kołowy mógłby biec dalej jako odchylony od podłużnej osi symetrii toru o kąt natarcia, gdyby na niego nie działały żadne siły boczne. Ale najczęściej działa jakaś siła poprzeczna (np. pochodząca od wiatru bocznego). Siła ta spycha zestaw kołowy w bok od jego trajektorii, powodując dwa skutki:

- przesunięcie poprzeczne zestawu kołowego w stosunku do toru
- zwiększenie kąta natarcia po przejeździe przez odcinek pozbawiony prowadzenia bocznego.

Komitet Ekspertów ORE dokonał wiele analiz i pomiarów stwierdzając, że ta w/w siła poprzeczna nigdy nie bywa większa niż 1/3 nacisku pionowego zestawu kołowego na tor. Stwierdził też, że poślizg poprzeczny zestawu kołowego w krzyżownicy nigdy nie bywa większy niż 20 % przebytej długości drogi wzdłuż toru, a kąt natarcia nigdy nie osiąga wartości większej niż  $1^{\circ}$ . Wyniki badań opisano w raporcie ORE C9/RP8 [13].

Z tytułu zboczenia zestawu kołowego o kąt  $1^{\circ}$  może wyniknąć dodatkowe przemieszczenie poprzeczne  $\Delta y_{1^{\circ}}$  punktu styku koła z szyną w sercu rozwartokątnym na długości  $L_N$ :

$$\Delta y_{1^{\circ}} = L_N \cdot \sin 1^{\circ} = 107,5 \cdot 0,017452 = 1,88 \approx 1,9 \text{ mm}$$

Z tytułu poślizgu poprzecznego może wystąpić dodatkowe przemieszczenie poprzeczne  $\Delta y_{20\%}$  punktu styku koła z szyną:

$$\Delta y_{20\%} = L_N \cdot 0,02 = 107,5 \cdot 0,02 = 2,15 \text{ mm} \approx 2,2 \text{ mm}$$

W sumie przemieszczenie poprzeczne punktu styku koła z szyną na długości  $L_w$  może wynieść:

$$\Delta y = \Delta y_{1^{\circ}} + \Delta y_{20\%} = 1,9 + 2,2 = 4,1 \text{ mm}$$

Zatem punkt atakujący koło prawe może wystawać na zewnątrz poza linię prostą będącą przedłużeniem boku szyny, poz.1 z rys.19 o wielkość:

$$\Delta y_{proj} = a + b - C + \Delta y$$

Tu dla bezpieczeństwa trzeba przyjąć najmniejsze C, największe a i najmniejsze b. Otrzyma się:

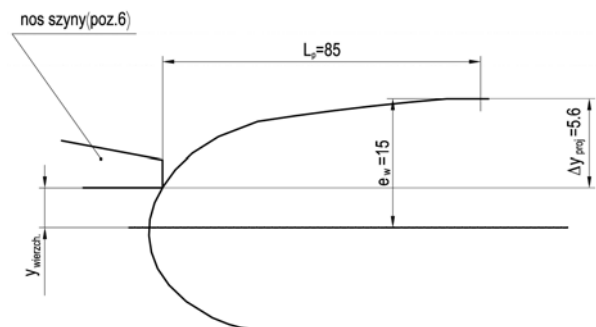
$$\Delta y_{proj} = 1360^{+3} + 32,5_{-5} - 1395_{-2}^{+3} + 4,1 =$$

$$= 1396,6_{-5}^{+3} - 1395_{-2}^{+3} = 1,6_{-8}^{+4} \text{ mm}$$

Największe wystawanie punktu atakującego wyniesie:

$$\Delta y_{proj \max} = 5,6 \text{ mm}$$

Środek wierzchołka obrzeża koła będzie oddalony od boku nosa szyny o wielkość  $y_{wierzch.}$ , co pokazano na rys 27



Rys. 27. Wejście obrzeża koła w szynę

$$y_{wierzch} = -\Delta y_{proj\ max} + e_w = -5,6 + 15 = 9,4\ mm$$

Z rys.27 wynika, że koło wchodzi między szynę, poz.6 z rys.19 a kierownicę poz.10 w taki sposób, że bok zewnętrzny obrzeża zetknie się z nosem szyny (poz.6) swoim punktem oddalonym od osi symetrii wierzchołka obrzeża o wielkość równą co najmniej  $y_{wierzch} = 9,4\ mm$ .

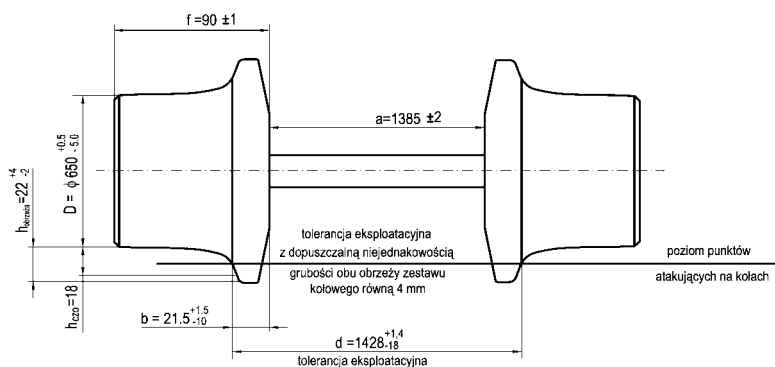
Bok nosa szyny (poz.6, z rys.19) bez trudu skoryguje kierunek biegu zestawu kołowego.

Tym sposobem Komitet Ekspertów ORE wykazał możliwość stosowania w wagonach kół o średnicach małych  $D \geq 330\ mm$  (gdyż prawdopodobieństwo wykołowania jest wtedy znikome, mimo braku prowadzenia zestawu kołowego na długości 108 mm), pod następującymi warunkami:

- grubość obrzeża nigdy nie będzie mniejsza niż  $e_{min} = 27,5\ mm$  (taki wymiar ogranicza kąt atakowania szyny poz.1 przez zestaw kołowy do wartości  $\alpha_{mk} = 0^{\circ}22'50''$ , dzięki czemu kąt ten nie zdąży rozwinąć się w sercu rozwartokątym krzyżownicy do wartości większej niż  $1^{\circ}$ )
- szerokość wieńca koła nie będzie mniejsza niż  $f_{mk} = 135_{-2}^{+5}$  (taki wymiar umożliwi bezudarowe przejeżdżanie krzyżownicy przez zestaw kołowy, czyli stabilny kontakt pionowy koła z szyną, a zatem mały poślizg poprzeczny, nie przekraczający 20 %).

## 5.5. Jazda tramwajowego zestawu kołowego po kolejowej krzyżownicy rozwartokątnej

### 5.5.1. Wymiary tramwajowego zestawu kołowego niezgodne z wymaganiami karty UIC 510-2



Rys. 28. Zestawienie wymiarów tramwajowego zestawu kołowego niezgodnych z kartą UIC 510-2 [6]

### 5.5.2. Omówienie znaczenia poszczególnych wymiarów niezgodnych z wymaganiami karty UIC 510-2

#### a) Znaczenie średnicy koła $D = 650\ mm$

Średnica ta nie stanowi przeszkody w przejeżdżaniu przez krzyżownice rozwartokątne, gdyż można do tej średnicy zastosować te same reguły, co dla małych kół kolejowych, odnośnie do których Komitet Ekspertów ORE C9 wykazał, że chociaż na krzyżownicach

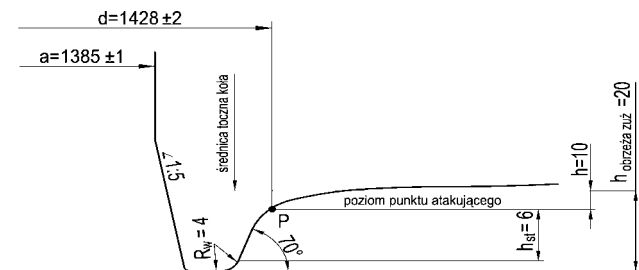
rozwartokątnych nie ma stuprocentowego bezpieczeństwa małych kół przed wykołowaniem, to jednak prawdopodobieństwo wykołowania jest znikome, jeśli są spełnione warunki wymienione w pkt.5.4. [12].

#### b) Znaczenie wysokości obrzeża $h_{obrz} = 22\ mm$

Na kolejach całego świata, w tym również i PKP przyjęto tylko dwa rodzaje wysokości obrzeża:  $h_{obrz} = 28^{+8}\ mm$  oraz  $h_{obrz} = 32^{+4}\ mm$ , przy czym podane tu tolerancje są tolerancjami eksploatacyjnymi.

Jednak istotna jest nie tyle wysokość całkowita obrzeża, czy wysokość czynna obrzeża, ile wysokość stożka ściętego zewnętrznego boku obrzeża. Ta wysokość dla kół kolejowych wynosi wg karty UIC 510-2  $h_{st} = 5,7\ mm$ . Dla najbardziej zużytego koła tramwajowego wynosi ona  $h_{st\ tramw} = 20 - R_w - h = 20 - 4 - 10 = 6\ mm$ . Jest to niemal identyczna wartość, jak dla koła kolejowego.

Obrzeże koła tramwajowego jest ukształtowane wg rys. 29:



Rys. 29. Obrzeże koła tramwajowego

Zatem ta wielkość nie stanowi przeszkody, uniemożliwiającej kołom tramwajowym jazdę po torach kolejowych.

Na całym świecie, w tym również i w Polsce, jest wiele tras tramwajowych zbudowanych z szyn kolejowych i nie ma problemu z jazdą tramwajowych zestawów kołowych po tych szynach (ale nie dotyczy to jazdy po sercach kolejowych zwrotnic i krzyżownic, gdyż takich serc nie ma na liniach tramwajowych).

#### c) Znaczenie rozstawu punktów atakujących $d = 1428\ mm$

Jest to wymiar większy niż na kolei, gdzie w stanie nowym  $d = 1426\ mm$ . Decyduje zresztą wartość zużyta  $d$ , a ta jest dla tramwajów identyczna jak dla kolei i wynosi  $d = 1410\ mm$ .

#### d) Znaczenie rozstawu wewnętrznego czół kół $a = 1385\ mm$

Przy takim wymiarze „a” odległość od wewnętrznego czola jednego koła do punktu atakującego drugiego koła w stanie nowym wynosi:

$$c_{ab} = a + b = 1385_{\pm 1} + 21,5_{-8,5}^{+0,2} = 1406,5_{-9,5}^{+1,2}\ mm$$

a zatem maksymalny wymiar może wynosić  $c_{ab\ max} = 1407,7\ mm$ .



Jest to znacznie więcej niż wymiar szerokości prowadzącej krzyżownicy równy  $C = 1395_{-2}^{+3}$  mm w stanie zużyтым. Może się zatem zdarzyć, że gdy lewe koło będzie prowadzone przez kierownicę lewego serca rozwartokątnego krzyżownicy, to punkt atakujący prawego koła będzie wystawał na zewnątrz poza linię będącą przedłużeniem bocznej krawędzi prawej szyny na odcinku, gdzie nie ma tego boku, o wielkość

$$\Delta c = c_{ab} - C = 1406,5_{-9,5}^{+1,2} - 1395_{-2}^{+3} = 11,5_{-12,5}^{+1,7} \text{ mm}$$

Zatem maksymalny wymiar  $\Delta c$  może wynosić 13,2 mm.

Jest to więcej niż połowa grubości nowego obrzeża koła tramwajowego, a zatem prawe koło z dużym prawdopodobieństwem ma możliwość uderzyć swoim wierzchołkiem obrzeża o czoło nosa serca skrzyżowania, po czym wspiać się na główkę szyny zakończonej tym nosem, a wtedy zestaw kołowy wykolei się ze stuprocentową pewnością. Zatem wymiar  $a = 1385_{\pm 1}$  mm całkowicie dyskwalifikuje tramwajowy zestaw kołowy dla przejazdu przez serca rozwartokątne w krzyżownicy kolejowej.

#### e) Znaczenie szerokości obrzeża $b = 21,5$ mm

Tolerancja eksploatacyjna szerokości obrzeża obręczy wynosi  $b = 21,5_{-8,0}^{+1,5}$  mm.

Gdy koło jest prowadzone przez kierownicę, to wózek tramwajowy może ustawić się pod kątem  $\alpha_{tramw}$

$$\alpha_{tramw} = \frac{E_{\max} - b_{\min}}{p_{tramw}} = \frac{43 - 13,5}{1900} = 0,015789472 \text{ rad} = 0,904707^{\circ} = 0^{\circ}54' \approx 1^{\circ}$$

Z tego wynika, że tramwajowy zestaw kołowy już w chwili wchodzenia w krzyżownicę może być odchyłony od prostopadłej do kierunku toru o kąt, jaki Komitet Ekspertów ORE uznał za graniczny dopuszczalny po przebiegnięciu krzyżownicy.

Jeśli zestaw kołowy już wyczerpuje kąt  $\alpha = 1^{\circ}$  w chwili wejścia w krzyżownicę, to w chwili wyjścia z krzyżownicy może on tę wartość znacznie przekroczyć. To również dyskwalifikuje tramwajowy zestaw kołowy dla przejazdu przez serca rozwartokątne w krzyżownicy kolejowej.

Przy założeniu, że zestaw kołowy jest prowadzony przez tor w krzyżownicy do punktu A (rys.19) przez szynę, a kierownica w ogóle nie uczestniczy w jego prowadzeniu, wystąpi kąt  $\alpha_{\max krz} = 0^{\circ}40'$  (punkt 5.4) narzucony przez szyny; wówczas nie występuje odcinek AK (rys.19) o długości  $l_{AK} = 77,5$  mm. Zatem długość odcinka pozbawionego prowadzenia bocznego wyniesie w takim przypadku

$$L_{FK} = l_{AF \text{ zuż}} = 405 \text{ mm (wzór (16) przyjmując } l_{AK} = 0)$$

Wielkość  $H$  we wzorze (17) staje się zerem, a wyrażenie  $L_L$  będzie równe:

$$L_{L \text{ tramw}} = \sqrt{D_{\min} \cdot h_{cz \text{ obrz}}}$$

gdyż obrzeże koła tramwajowego nie posiada w ogóle płaskiej części o wysokości  $h_{pl}$ , a rolę tej części pełni w pewnym sensie czynna wysokość obrzeża równa  $h_{cz \text{ obrz}} = 18$  mm.

Zatem:

$$L_{L \text{ tramw}} = \sqrt{600 \cdot 18} = 103,92 \text{ mm} \approx 104 \text{ mm}$$

$L_P$  wyniesie (wzór 18):

$$L_{P \text{ tramw}} = \sqrt{D \cdot (h_{czo} - y_n)} = \sqrt{600 \cdot (18 - 8)} = 77,45 \text{ mm} \approx 77 \text{ mm}$$

Wobec tego

$L_{\text{bezp tramw}} = L_{L \text{ tramw}} + L_{P \text{ tramw}} = 104 + 77 = 181$  mm, a długość odcinka bez żadnego prowadzenia bocznego wyniesie

$$L_{N \text{ tramw}} = l_{npr} - (L_{L \text{ tramw}} + L_{P \text{ tramw}}) = 432 - 181 = 251 \text{ mm}$$

To jest wartość ponad dwukrotnie większa od wartości  $L_N = 108$  mm dla najmniejszych kół kolejowych o średnicy  $D = 330$  mm.

Zakładając optymistyczne, że kąt  $\alpha$  nie przekroczy  $1^{\circ}$  (choć przy długości nie prowadzonej  $L_{N \text{ tramw}} = 251$  mm jest to założeniem niczym nie uzasadnionym i bardzo ryzykownym), oraz że poślizg poprzeczny nie przekroczy 20 ‰ (co również jest bardzo optymistycznym założeniem przy tak dużej wartości  $L_{N \text{ tramw}}$ ), przemieszczenia poprzeczne punktu atakującego prawego koła będą następujące:

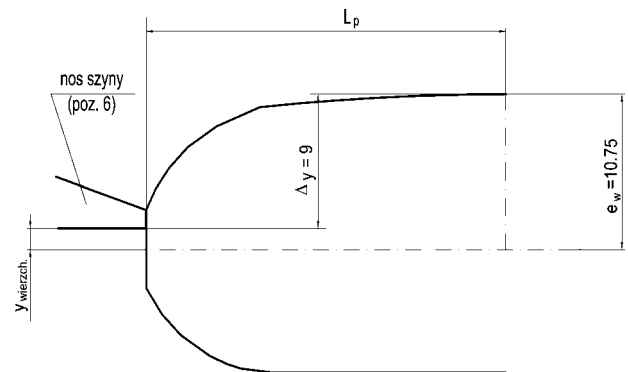
$$\Delta y_{1^{\circ}} = L_{N \text{ tramw}} \cdot \sin 1^{\circ} = 251 \cdot 0,01745 = 4,37995 \text{ mm} \approx 4,4 \text{ mm}$$

$$\Delta y_{20\text{‰}} = L_{N \text{ tramw}} \cdot 0,02 = 251 \cdot 0,02 = 5,02 \text{ mm}$$

Zatem łącznie

$$\Delta y = \Delta y_{1^{\circ}} + \Delta y_{20\text{‰}} = 4,4 + 5,02 = 9,42 \approx 9 \text{ mm}$$

Obrzeże wejdzie w nos szyny (poz.6, na rys.19) jak pokazano na rys.30.



Rys. 30. Wejście obrzeża w nos szyny

$$y_{wierzch} = -\Delta y + e_w = -9 + 10,75 = 1,75 \approx 2 \text{ mm}$$

Koło uderzy w czoło nosa swoim wierzchołkiem, uniesie się na główkę szyny będącą przedłużeniem tego nosa i z pewnością wykołei się na kolejowej krzyżownicy.

#### f) Znaczenie szerokości wieńca koła $f = 90 \text{ mm}$

Z rys.20 wynika, że szerokość „pustego miejsca” w sercu krzyżownicy tuż przy rzeczywistym nosie serca przy uwzględnieniu zużycia szerokości rowka, wynosi:

$$W_{serca} \approx 2E_{max} + w_n + x_n = 2 \cdot 43 + 2 + 3 = 91 \text{ mm}$$

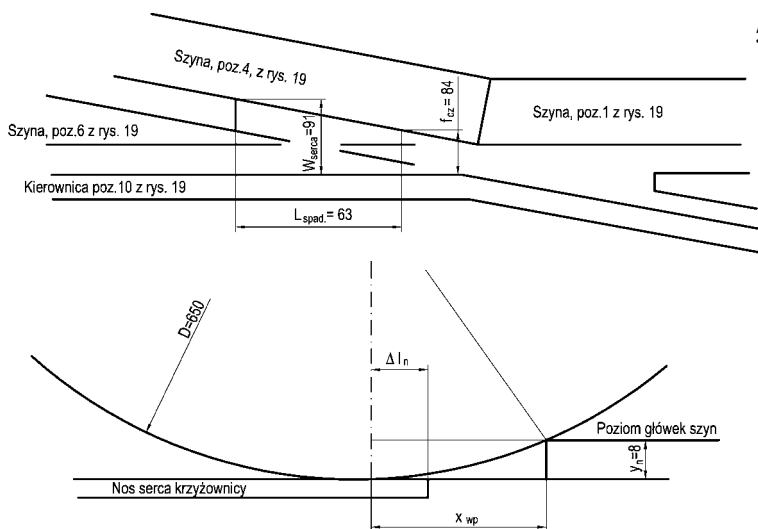
Szerokość czynna wieńca koła tramwajowego (po uwzględnieniu załamania krawędzi zewnętrznej oraz ujemnej tolerancji szerokości) wynosi:

$$f_{cz} = 90 - 1 - 5 = 84 \text{ mm}$$

Skutkiem tego koło wpadnie w to puste miejsce, spadając dynamicznie na nos serca znajdujący się o  $y_n = 8 \text{ mm}$  poniżej płaszczyzny główek szyn, (z rys.21 i 24). Wydarzy się to w odległości od czoła nosa równej

$$L_{spad} = \frac{91 - 84}{\frac{1}{9}} = 63 \text{ mm}$$

Wytworzy się sytuacja pokazana na rys.31.



Rys. 31. Wpadanie koła tramwajowego w „puste miejsce” w sercu krzyżownicy

Zachodzi tu zależność:

$$\frac{D_{min}^2}{4} = \left( \frac{D_{min}}{2} - y_n \right)^2 + x_{wp}^2$$

Stąd

$$\begin{aligned} x_{wp} &= \sqrt{\frac{D_{min}^2}{4} - \left( \frac{D_{min}}{2} - y_n \right)^2} = \sqrt{D_{min} \cdot y_n - y_n^2} = \\ &= \sqrt{D_{min} \cdot y_n \cdot \left( 1 - \frac{y_n}{D_{min}} \right)} \approx \sqrt{D_{min} \cdot y_n} = \\ &= \sqrt{600 \cdot 8} = 69 \text{ mm} \end{aligned}$$

Wyrażenie  $\frac{y_n}{D_{min}}$  jako bardzo małe w stosunku do jedynki pomija się.

Spadające koło uderzyłoby w nos szyny (poz.6 z rys.19) w odległości  $\Delta l_n$  od czoła nosa

$$\Delta l_n = x_{wp} - L_{spad} = 69 - 63 = 6 \text{ mm}$$

Szerokość nosa w tym miejscu wynosi:

$$b_{nosa} = w_n + \Delta l_n \cdot \frac{1}{9} = 2 + 6 \cdot \frac{1}{9} = 2,666 \text{ mm}$$

Jest to szerokość mała i z pewnością pod wpływem dynamicznego uderzenia nos szyny uległby złamaniu lub wyszczerbieniu.

Dla odmiany podczas jazdy w przeciwnym kierunku koło musiałoby unieść się w górę o  $y_n = 8 \text{ mm}$ . Zamiast tego koło to usiłowałoby rozepchać serce krzyżownicy i chyba to nastąpiłoby, gdyż zbieżność 1:9 działałaby jak klin rozpychający, niszcząc krzyżownicę i powodując wykołnienie.

Zatem szerokość wieńca  $f_{wk} = 90^{\pm 1} \text{ mm}$  dyskwalifikuje koło tramwajowe do jazdy po krzyżownicach kolejowych.

Z analizy wynika, że tramwajowy zestaw kołowy w żadnym przypadku nie jest w stanie przejechać przez krzyżownicę rozwartokątną.

## 5.6. Jazda uniwersalnego zestawu kołowego po krzyżownicy rozwartokątnej toru kolejowego

Uniwersalny zestaw kołowy to jest taki, który może jeździć bezpiecznie po krzyżownicy rozwartokątnej toru kolejowego i równocześnie po torze tramwajowym i jest przewidziany do zastosowania w tramkolu.

Z dokonanej analizy zagadnienia wynika, że koło uniwersalnego zestawu kołowego powinno mieć odpowiedni kształt.

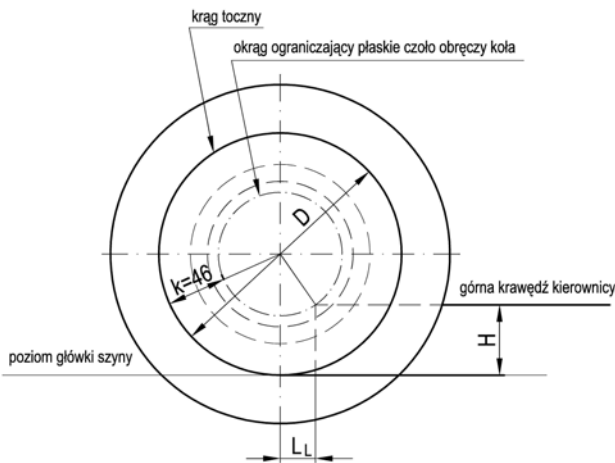
### Omówienie poszczególnych parametrów jazdy

**a) Długość rzeczywistej łuki w skrzyżowaniu, kiedy zestaw kołowy nie jest prowadzony ani prawostronnie przez bok prawej szyny ani lewostronnie przez kierownicę.**

Z punktu 5.2.3. wynika, że omawiana długość łuki wynosi  $l_{FK} = 327,5 \text{ mm}$ .

**b) Długość drogi przebytej przez środek lewego koła**

Przeanalizowano ruch lewego koła, gdy zestaw kołowy jest prowadzony przez lewą kierownicę krzyżownicy od chwili, gdy punkt styku bieżni koła z szyną znajdował się w miejscu załamania lewej kierownicy serca rozwartokątnego (poz.9 z rys.19) do chwili, gdy płaskie czoło tego koła wyjdzie poza kontur kierownicy. Sytuację pokazano na rys.32.



Rys. 32. Współpraca lewego koła z lewą kierownicą serca rozwartokątne

Zachodzi zależność:

$$L_L = \sqrt{\left(\frac{D}{2} - k\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - H\right)^2} = \left(1 - \frac{H+k}{2D}\right) \cdot \sqrt{D \cdot (H-k)}$$

Wyrażenie  $\frac{H+k}{2D}$  w zestawieniu z jedyneką można pominąć.

Zatem

$$L_L \approx \sqrt{D \cdot (H-k)} \quad (19)$$

Wiadomo, że dla umożliwienia ruchu uniwersalnych zestawów kołowych wysokość kierownicy musi być odpowiednio wysoka. Np. dla  $H = 60$  mm i  $D = 550$  mm (oba wymiary w stanie najbardziej zużyтым):

$$L_L = \sqrt{550 \cdot (60 - 46)} = 87,74 \approx 88 \text{ mm}$$

### e) Długość cięciwy czynnej prawego koła

W omawianej chwili cięciwa okręgu czynnego obrzeża prawego koła na poziomie obniżonego nosa prawego serca krzyżownicy będzie oddalona od pionowej płaszczyzny symetrii zestawu kołowego o wielkość  $L_P$ , która jest określona wzorem (18).

$$L_P = \sqrt{D \cdot (h_{zuż} - y_n)}$$

Dla  $D = 550$  mm i  $h = 22_{-2}^{+4}$  mm (rys.2) wysokość  $y_n$  nosa krzyżownicy wynosi 8 mm.

Z kolei

$$h_{zuż} = h_{min} - r_w = (22 - 2) - 4 = 16 \text{ mm}$$

Zatem

$$L_P = \sqrt{550 \cdot (16 - 8)} = 66,33 \approx 66 \text{ mm}$$

Suma odległości  $L_L$  i  $L_P$  wyniesie

$$L_L + L_P = 88 + 66 = 154 \text{ mm}$$

Jest to mniej niż wynosi długość rzeczywistej łuki w sercu krzyżownicy, równa  $L_{FK} = 327,5$  mm.

### d) Długość nie prowadzona w sercu krzyżownicy

Długość odcinka w prawym sercu krzyżownicy, na którym zestaw kołowy nie byłby prowadzony prawostronnie, wynosi:

$$L_{N_{uniw}} = L_{FK} - (L_L + L_P) = 327,5 - 154 = 173,5 \text{ mm}$$

Na tym odcinku uniwersalny zestaw kołowy nie byłby w ogóle prowadzony prawostronnie. Jest to odcinek dłuższy o 70% od analogicznego odcinka występującego w przypadku, gdy przez krzyżownicę przejeżdżają małe koła kolejowych zestawów kołowych o średnicy 330 mm (wtedy  $L_N = 108$  mm).

### e) Przeszczenie poprzeczne zestawu kołowego w krzyżownicy

Kąt natarcia wózka na lewą kierownicę krzyżownicy wyniesie  $\alpha_{mk} = 0^{\circ}22'50''$ , identycznie jak w punkcie 5.4.

Zakładając, że kąt  $\alpha_{mk}$  nie przekroczy  $1^{\circ}$  na długości nieprowadzonej  $L_{N_{uniw}}$  w krzyżownicy, a długość ta jest o 70% większa niż długość  $L_N$  w przypadku małych kół kolejowych, co jest założeniem niczym nie uzasadnionym i bardzo ryzykownym, oraz że poślizg poprzeczny koła nie przekroczy 20 %, (co również jest bardzo ryzykownym założeniem wobec długości  $L_{N_{uniw}} = 173,5$  mm) przeszczenie poprzeczne punktu atakującego prawego koła wyniosą:

$$\Delta y_{1^{\circ}} = L_{N_{uniw}} \cdot \sin 1^{\circ} = 173,5 \cdot 0,017452 = 3,03 \approx 3 \text{ mm}$$

$$\Delta y_{20\%} = L_{N_{uniw}} \cdot 0,02 = 173,5 \cdot 0,02 = 3,48 \approx 3,5 \text{ mm}$$

Zatem łącznie

$$\Delta y = \Delta y_{1^{\circ}} + \Delta y_{20\%} = 3 + 3,5 = 6,5 \text{ mm}$$

Będzie to o 50% większe przeszczenie poprzeczne zestawu kołowego w krzyżownicy niż to, które występuje w przypadku małych kół kolejowych na tej samej krzyżownicy rozwartokątnej.

### f) Położenie wierzchołka obrzeża w stosunku do nosa krzyżownicy

W tym przypadku w krzyżownicy z początku prowadziła kierownica (poz.9 z rys.19), a zatem:

$$\Delta y_{proj} = a_{kol} + b_{tram.} + g - C_{zwr} + \Delta y = 1360_{-1}^{+1} + 21,5_{-8,5}^{+0,2} + 12,5 - 1395_{-2}^{+3} + 6,5 = 1400,5_{-9,5}^{+1,2} - 1395_{-2}^{+3} = 5,5_{-12,5}^{+3,2} \text{ mm}$$

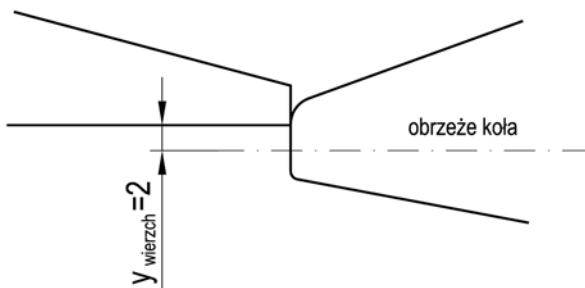
Największe możliwe wystawanie punktu atakującego poza bok szyny wyniesie:

$$\Delta y_{proj \max} = 8,7 \text{ mm} \approx 9 \text{ mm}$$

Jest to o 50% więcej niż wystawanie punktu atakującego małego koła kolejowego poza bok szyny (punkt 5.4).

Środek wierzchołka koła będzie oddalony od boku nosa szyny o wielkość  $y_{wierzch}$  (rys.33).

$$y_{wierzch} = -\Delta y_{proj\ max} + \frac{b}{2} = -9 + \frac{21,5}{2} = 1,75\ mm \approx 2\ mm$$



Rys. 33. Wejście obrzeża w nos szyny

Obrzeże koła może trafić akurat na narożnik nosa w krzyżownicy, a to może spowodować wykolejenie uniwersalnego zestawu kołowego kolejowo-tramwajowego w krzyżownicy rozwartokątnej.

### 5.7. Wnioski

Uniwersalny zestaw kołowy kolejowo-tramwajowy wykazuje bardzo duże prawdopodobieństwo wykolejenia się podczas przejazdu przez kolejową krzyżownicę rozwartokątną.

Zatem na torach kolejowych, po których miałyby kursować tramkole, należałoby usunąć wszystkie krzyżownice rozwartokątne, a więc wszystkie rozjazdy angielskie. Tam gdzie jest obfitość miejsca w głowicy rozjazdowej, każdy z takich rozjazdów angielskich należałoby zastąpić dwoma zwrotnicami przeciwbieżnymi. Układ dwu przeciwbieżnych zwrotnic spełnia wszystkie te funkcje, które pełni rozjazd angielski, ale zajmuje znacznie więcej miejsca niż ten rozjazd. Gdy na stacji kolejowej nie ma wystarczająco dużo miejsca na taką zamianę, to należy:

- albo zrezygnować z rozjazdów angielskich bez jakiegokolwiek ekwiwalentu,
- albo zrezygnować z ruchu tramkoli w tym miejscu.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

### 6.1. Uwagi ogólne

Spośród będących w eksploatacji zestawów kołowych, zarówno kolejowych jak i tramwajowych, nie jest możliwe wytypowanie takich zestawów, które mogłyby bezproblemowo jeździć zarówno po torach kolejowych jak i tramwajowych. Jak wynika z przedstawionej technicznej analizy zagadnienia, powodem tego jest „inna” współpraca zestawu kołowego z torrem.

Rozpatrzono następujące przypadki takiej współpracy:

- a) jazda po prostych torach kolejowych i tramwajowych,
- b) jazda po łukach torów,

- c) jazda po zwrotnicach,
- d) jazda po kolejowych krzyżownicach rozwartokątnych (w tym jazda kół o małych średnicach), przy czym uwzględniono jazdę:

- kolejowego zestawu kołowego po torze zbudowanym z szyn kolejowych
- tramwajowego zestawu kołowego po torze zbudowanym z szyn kolejowych
- kolejowego zestawu kołowego po torze zbudowanym z szyn tramwajowych
- tramwajowego zestawu kołowego po torze zbudowanym z szyn tramwajowych.

W analizie uwzględniono tolerancje wykonawcze i eksploatacyjne zestawów kołowych i ich elementów oraz graniczne zużycie kół i szyn.

### 6.2. Podsumowanie poszczególnych przypadków współpracy

#### a) Jazda po torze prostym

Kolejowy zestaw kołowy z zarysem wg PN nie może w ogóle jeździć po torach zbudowanych z szyn tramwajowych.

Powody są następujące:

1. kolejowy zestaw kołowy zawsze toczy się swoją bieżnią po główce szyny i zużywa się tylko bieżnia koła, w wyniku czego maleje średnica toczna koła i w miarę przebiegu wysokość obrzeża koła zwiększa się, co uniemożliwiałoby przejazd w rowkach szyn tramwajowych,
2. rozstaw wewnętrznych krawędzi prowadnic szyn tramwajowych jest większy niż rozstaw czół obrzeży kół kolejowych zestawu kołowego i obrzeże jednego z kół nie wejdzie w rowek szyny tramwajowej (obrzeża kół kolejowych nie zmieszczą się w rowkach szyn tramwajowych).

Natomiast tramwajowy zestaw kołowy może jeździć po torach zbudowanych z szyn kolejowych (wydzielone torowiska dla tramwajów zbudowane są w wielu miastach w Polsce z szyn kolejowych).

#### b) Jazda po łukach torów

Przejazd kolejowego zestawu kołowego po łuku toru zbudowanego z szyn tramwajowych nie jest możliwy (powody podano w pkt. a).

Przejazd kolejowego zestawu kołowego po łuku toru zbudowanego z szyn kolejowych ale bez poszerzenia prześwitu toru jest w pełni możliwy.

Przejazd tramwajowego zestawu kołowego po łuku toru zbudowanego z szyn kolejowych z poszerzeniem prześwitu toru nie jest możliwy, bo szerokość obręczy kół tramwajowych  $f = 90\ mm$  jest za mała i na łuku wystąpiłoby wykolejenie. Natomiast przejazd tramwajowego zestawu kołowego po łuku toru zbudowanego z szyn kolejowych ale bez poszerzenia prześwitu toru jest możliwy.

### c) Jazda po zwrotnicach

Przejazd kolejowego zestawu kołowego po zwrotnicy kolejowej zarówno w kierunku prostym w skrajnie prawym położeniu jak również w kierunku łukowym jest w pełni możliwy, gdyż szerokość obręczy wynosi 135 mm i spełniony jest warunek, że  $f > 102$  mm.

Natomiast jazda tramwajowego zestawu kołowego po zwrotnicy kolejowej nie jest możliwa dla szerokości obręczy koła 90 mm, gdyż wzajemne ustawienie obrzeża koła i nosa zwrotnicy w najbardziej niekorzystnym przypadku spowoduje wykolejenie zestawu kołowego.

Z tego względu dla koła przewidzianego do zastosowania w tramkolu określono potrzebne wymiary oraz określono niezbędną wysokość kierownicy szyny dla zwrotnicy.

### d) Jazda po kolejowej krzyżownicy rozwartokątnej

Przejazd kolejowego zestawu kołowego po kolejowej krzyżownicy rozwartokątnej stosowanej w eksploatacji jest w pełni możliwy.

Długość luki w skrzyżowaniu, kiedy zestaw kołowy nie jest prowadzony przez powierzchnię boczną szyny zewnętrznej jest kompensowana przez kierownicę serca rozwartokątnego. Oznacza to, że zanim lewe koło zestawu utraci prowadzenie boczne realizowane przez kierownicę krzyżownicy, to już jego prawe koło przejedzie poza nos serca krzyżownicy i uzyska prowadzenie boczne realizowane przez prawą szynę toru.

Podobna sytuacja zachodzi również przy przejeździe kół o małych średnicach ( $D \geq 330$  mm) pod pewnymi warunkami (np. wysokość obrzeży kół zwiększono z 28 na 32 mm, wymiar szerokości prowadnej zestawu kołowego nie może być mniejszy niż 1415 mm, inne tolerancje wymiarów wieńca koła itp.). Komitet Ekspertów ORE dokonał wiele pomiarów i analiz w tym zakresie (m. in. poślizgu poprzecznego zestawu kołowego, siły poprzecznej i kąta natarcia) i wykazał możliwość stosowania kół o małych średnicach pod określonymi warunkami uznając, że prawdopodobieństwo wykolejenia przy przejeździe przez krzyżownicę rozwartokątną jest znikome [12].

Natomiast tramwajowy zestaw kołowy nie jest w stanie przejechać przez krzyżownicę rozwartokątną, gdyż musi się wykoleić. Również uniwersalny zestaw kołowy kolejowo-tramwajowy wykazuje duże prawdopodobieństwo wykolejenia się podczas przejazdu przez kolejową krzyżownicę rozwartokątną.

### 6.3. Zestaw kołowy dla tramkolu

Na podstawie dokonanej analizy proponuje się dla kół przewidzianych do tramkoli zastosowanie wieńca koła o odpowiednich wymiarach i kształcie podanych w [14].

Na odcinku od punktu atakującego (pkt.P) do wewnętrznej powierzchni wieńca kształt bieżni koła powinien być zgodny z normą PN-91/K-88251 [7].

Zaproponowane koło, czy to nowe czy zużyte w dopuszczalnych granicach, może toczyć się bez obawy po szynie tramwajowej wg PN-92/H-93440 [9]. Nie nastąpi zetknięcie koła z prowadnicą szyny tramwajowej ani z prowadnicą szyny kolejowej.

### 6.4. Warianty realizacji przejazdu

Istnieją dwa realne warianty realizacji przejazdu tego samego zestawu kołowego zarówno po torze kolejowym jak i tramwajowym.

Wynikające z analizy wnioski umożliwiłyby jazdę tramkolei zarówno po torach kolejowych jak i tramwajowych, ale pod warunkiem:

- przebudowy torów kolejowych albo
- przebudowy pojazdów tramwajowych i małych przeróbek torów.

#### 6.4.1. Wariant z przebudową torów kolejowych

Na torach kolejowych, po których miałyby jeździć tramkole, należałoby wprowadzić następujące przeróbki:

- a) zlikwidować wszystkie krzyżownice rozwartokątne (tzn. rozjazdy angielskie), zastępując je (tam gdzie to jest możliwe) układem dwu przeciwbieżnych zwrotnic. Taki układ spełnia wszystkie funkcje rozjazdu angielskiego, ale niestety zajmuje znacznie więcej miejsca w głowicy rozjazdowej.

Przejazd uniwersalnego zestawu kołowego przez krzyżownicę rozwartokątną jest związany z dużym prawdopodobieństwem wykolejenia. Obliczenia zawarte w pkt.5 niniejszego artykułu zostały wykonane w oparciu o założenia o dużym stopniu niepewności. Gdyby chciał zaryzykować przejazdu uniwersalnego zestawu kołowego przez rozjazdy angielskie, to należałoby najpierw wykonać setki prób z pomiarami kąta odbiegania zestawu kołowego od położenia początkowego przy kierownicy podwójnego serca krzyżownicy oraz z pomiarami poślizgu poprzecznego zestawu kołowego w tym podwójnym sercu.

Wszystkie te próby musiałyby dać pozytywne rezultaty, a nadzieja na to jest wątpliwa.

Stopień trudności tych prób byłby znaczny, a koszt ogromny.

Wobec tego należy uznać, że stopień niepewności takiego przejazdu jest bardzo duży. Zatem na trasach, po których miałyby jeździć tramkole, należy usunąć wszystkie rozjazdy angielskie.

- b) wszystkie zwrotnice wymienić na takie, które posiadają zamykane serca, gdyż takie zwrotnice nie potrzebują w ogóle kierownic.

W przypadku niemożności lub nieopłacalności takiej wymiany, w zwrotnicach należałoby wymienić kierownice posiadające obecnie wysokość 45 mm ponad główkę szyny na kierownice o większej wysokości. Takie kierownice są powszechnie stosowane np. we Francji,

- c) wszystkie łuki torów należałoby przerobić na takie, które są pozbawione poszerzenia prześwitu toru; wtedy prześwit toru na łukach byłby taki sam jak na torze prostym, czyli 1435 mm (tolerancja eksploatacyjna  $1435_{-3}^{+10}$  mm).

Po wprowadzeniu wymienionych przeróbek torów kolejowych, mogłyby po nich jeździć klasyczne tramwaje bez jakichkolwiek przeróbek.

Nie byłyby też potrzebne skrupulatne konserwacje torów tramwajowych zatopionych w jezdniach.

**Zalety** wariantu z przebudową torów kolejowych są następujące:

- jest to wariant najprostszy konstrukcyjnie i najbardziej funkcjonalny eksploatacyjnie oraz najbardziej wytrzymały w sensie żywotnościowym,
- nie trzeba wykonać żadnych przeróbek taboru tramwajowego.

**Wadą** tego wariantu jest wysoki koszt przeróbek torów kolejowych. Co prawda koszt przebudowy torów byłby jednorazowy i obejmowałby tylko obszar, po którym byłaby przewidziana jazda tramkolei.

#### 6.4.2. Wariant z przebudową pojazdów tramwajowych

Wagony tramwajowe, aby mogły jeździć po istniejących torach kolejowych i stać się tramkolami, musiałyby zostać przekonstruowane w sposób następujący:

- a) zastosowanie wieńca koła o proponowanych w [14] wymiarach i kształcie,
- b) podniesienie dolnego konturu skrajni kinematycznej tramwaju z obecnie obowiązującej wysokości 60 mm nad główką szyny na większe, aby tramkol mógł bezpiecznie przejechać nad wyższymi kierownicami zwrotnic kolejowych.

W związku z tym musiałyby zostać przekonstruowane wszystkie elementy tramwaju, zawieszane nisko na wózku czy podwoziu, takie jak: przekładnie zębate trakcyjne, hamulce tarczowe, korpusy maźnic, odgarniacze itp.

Ponadto na trasach kolejowych, po których miałyby jeździć tramkole, należałoby:

- wymienić kierownice w zwrotnicach na wyższe lub wymienić zwrotnice na takie, które posiadają zamykane serca (nie potrzebują kierownic)
- zlikwidować wszystkie krzyżownice rozwartokątne (rozjazdy angielskie) i zastąpić je układem dwu przeciwbieżnych zwrotnic.

Na torach tramwajowych, po których jeździłyby tramkole, trzeba byłoby skrupulatnie naprawiać wszelkie zapadnięcia szyn toru tramwajowego poniżej poziomu jezdni czy też poziomu betonowych płyt wypełniających podtorze, gdyż uniesienie się bieżni koła uniwersalnego (szerszej niż klasyczne koło tramwajowe) na asfalt jezdni lub na betonową płytę wypełniającą podtorze spowodowałoby wykolejenie tramkolei.

Po takiej przebudowie pojazdów tramwajowych i przeróbek infrastruktury kolejowej, tramkole mogłyby jeździć po istniejących torach kolejowych.

**Zaletą** wariantu z przebudową pojazdów tramwajowych jest stosunkowo nieduży koszt przeróbek infrastruktury kolejowej, które polegają na:

- wymianie kierownic w zwrotnicach kolejowych na kierownice o większej wysokości ponad główkę szyny lub wymianie zwrotnic na takie, które posiadają zamykane serca
- likwidacji rozjazdów angielskich z krzyżownicami rozwartokątnymi.

**Wady** tego wariantu są następujące:

- duże trudności w przekonstruowaniu elementów wagonów tramwajowych z powodu podniesienia dolnego konturu skrajni
- duże koszty eksploatacyjne utrzymania torów tramwajowych w stanie pozbawionym jakichkolwiek zapadnięć szyn tramwajowych poniżej poziomu jezdni czy poziomu płyt podtorza.

#### 6.5. Wnioski końcowe

Z analizy wynikają następujące wnioski końcowe:

1. Spośród będących w eksploatacji zestawów kołowych, zarówno kolejowych jak i tramwajowych, nie można wytypować takich zestawów, które mogłyby bezproblemowo jeździć zarówno po torach kolejowych jak i tramwajowych.
2. Istnieją dwa realne warianty realizacji przejazdu tego samego zestawu kołowego zarówno po torze kolejowym jak i tramwajowym pod warunkiem:
  - a) przebudowy torów kolejowych w zakresie podanym w pkt. 6.4.1 albo
  - b) przebudowy pojazdów tramwajowych i małych przeróbek torów kolejowych w zakresie podanym w pkt. 6.4.2.

**Wybór wariantu** powinien być dokonany w oparciu o analizę ekonomiczną, uwzględniającą koszty jakie należałoby ponieść dla realizacji poszczególnego wariantu, oddzielnie dla każdego obszaru, po którym byłaby przewidziana jazda tramkolei.

#### LITERATURA

- [6] *Karta UIC 510-2. Pojazdy doczepne. Warunki dla stosowania kół o różnych średnicach w układach biegowych różnego typu. Wydanie 4 z kwietnia 2004r.*
- [7] *PN-91/K-88251. Zestawy kołowe taboru tramwajowego. Kontur bieżni kół elastycznych wagonów tramwajowych.*
- [8] *Radreifen 2WU 022-206 h 1800 mm Achsabs-tand, rysunek niemiecki z r. 1993.*
- [9] *PN-92/H-93440. Stal. Szyny tramwajowe z rowkiem.*

- [10] *Przepisy D1 – Przepisy techniczne utrzymania i eksploatacji nawierzchni na liniach kolejowych normalnotorowych użytku publicznego, wprowadzone Zarządzeniem nr 47 Ministra Komunikacji z dn. 01.06.1982r.*
- [11] *Karta UIC 505-1. Pojazdy kolejowe. Skrajnia pojazdów. Wydanie 9 z listopada 2003 r.*
- [12] *ORE C9/RP7 “Wzajemne oddziaływanie pojazdu i toru. Zachowanie się małych kół przy przejeździe przez serca rozwartokątne i rozjazdy krzyżowe. (Wechselwirkung zwischen Fahrzeugen und Gleis. Verhalten kleiner Räder beim Überfahren von doppelten Herzstücken von Kreuzungen und Kreuzungsweichen)”. Utrecht, październik 1965.*
- [13] *ORE C9/RP8 “Wzajemne oddziaływanie pojazdu i toru. Zachowanie się małych kół przy przejeździe przez skrzyżowanie luków  $R=450$  m i kącie pochylenia rozjazdu 1:9 . (Wechselwirkung zwischen Fahrzeugen und Gleis. Verhalten kleiner Räder beim Überfahren einer Bogenkreuzung  $R = 450$  m, 1:9)”. Utrecht, czerwiec 1967.*
- [14] *OR-8331a Analiza możliwości przejazdu tego samego zestawu kołowego po torze kolejowym i tramwajowym. IPS „TABOR” 2005r. (praca niepublikowana).*
- [15] *Id-4 (D-6) Instrukcja o oględzinach, badaniach technicznych i utrzymaniu rozjazdów. Wydana przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w 2005 r.*
- [16] *R.Lang, R.Nowak: Uwarunkowania dla jazdy tego samego zestawu kołowego po torze kolejowym i tramwajowym (1). Pojazdy Szynowe nr 1/2006*