

Analiza numeryczna MES wpływu kształtu przekroju kabłąka na sztywność przyrządu do pomiaru kół zestawów kołowych

Andrzej ANISZEWICZ¹

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowej za pomocą metody elementów skończonych (MES), wykonanej w celu dokonania analizy wpływu kształtu przekroju kabłąków na sztywność przyrządów do pomiaru średnicy okręgu tocznego kół zestawów kołowych. Rozpatrywano dwa rodzaje przekroju kabłąka: prostokątny i złożony z czterech połączonych rurek cienkościennych. Przyrządy powinny spełniać wymagania norm ZN-00/PKP-3509-09 oraz BN-82 3509-13. Analiza MES modeli ujawniła niewystarczającą sztywność kabłąka, co pociąga za sobą konieczność zmian w konstrukcji istniejących przyrządów do pomiaru średnic okręgu tocznego kół zestawów kołowych.

Słowa kluczowe: średnica okręgu tocznego, pomiar, niezawodność, zestaw kołowy, metoda elementów skończonych, MES

1. Wprowadzenie

Jednym z najistotniejszych zadań transportu kolejowego, jest zapewnienie bezawaryjnej pracy i najwyższego poziomu bezpieczeństwa użytkownika taboru kolejowego. Zapewnione jest to między innymi przez okresową kontrolę średnic okręgu tocznego kół zestawów kołowych [1, 3]. Działając zgodnie z zapisami dokumentacji utrzymania taboru kolejowego, użytkownicy kontrolują i zapewniają dopuszczalną różnicę wartości średnic okręgu tocznego w zestawie kołowym między dwiema tarczami kół zestawu kołowego mniejszą lub równą 0,5 mm [5].

W rzeczywistości, wykonywanie takich pomiarów za pomocą przenośnych, ręcznych przyrządów jest bardzo utrudnione i bywa obciążone dużym błędem pomiaru, wynikającym ze zbyt małej sztywności kabłąka przyrządu. Pomiaru średnic okręgów tocznych kół zestawów kołowych wywiązanych z wózka wykonuje się między innymi ręcznymi, specjalistycznymi przyrządami, które powinny być zbudowane zgodnie z normami: branżową BN-82 3509-13 oraz zakładową ZN-00/PKP-3509-09 [4, 8]. Normy te określają główne wymiary konstrukcyjne przyrządu, cechy oraz rodzaj użytego materiału, cechy wykonanych elementów składowych, działanie, a także współdziałanie elementów składowych.

Podczas wykonywania pomiarów wspomnianymi przyrządami, mogą występować różnice wartości pomiaru średnicy okręgu tocznego tej samej tarczy

koła zestawu kołowego, przekraczające wartość dopuszczalną 0,5 mm [1]. Może to powodować utrudnienie prawidłowego i wiarygodnego określenia różnicy wartości średnic okręgów tocznych obu tarcz kół w zestawie kołowym. W instrukcji obsługi przyrządu do pomiaru średnic okręgu tocznego kół zestawów kołowych opisano prawidłowy sposób wykonywania pomiaru. Powinien on być wykonywany w pozycji poziomej, a osoba mierząca chwyta przyrząd pomiarowy dwiema rękami za oba końce kabłąka. Taki sposób pomiaru może być realizowany tylko przy wykonywaniu pomiarów tarcz kół zestawów kołowych wywiązanych z wózków i ze zdemontowanymi elementami układu hamulcowego. W przypadku wykonywania pomiaru średnicy okręgu tocznego w inny sposób niż opisuje instrukcja obsługi przyrządu, różnice wartości pomiaru średnicy okręgu tocznego tego samego koła mogą być znacznie większe. Chwytnie przyrządu pomiarowego jedną ręką za jeden koniec przyrządu lub koniec kabłąka, wykonywanie pomiaru w pozycji pochyłej może powodować, że otrzymane wyniki pomiarów będą różne (5–10 razy mniejsze lub większe od rzeczywistych).

2. Problem badawczy i metoda badawcza

Podczas wykonywania pomiarów średnicy okręgu tocznego kół zestawów kołowych zauważono małą sztywność kabłąka ręcznego przyrządu wy-

¹ Mgr inż.; Instytut kolejnictwa, Laboratorium Metrologii, e-mail: aaniszewicz@ikolej.pl.

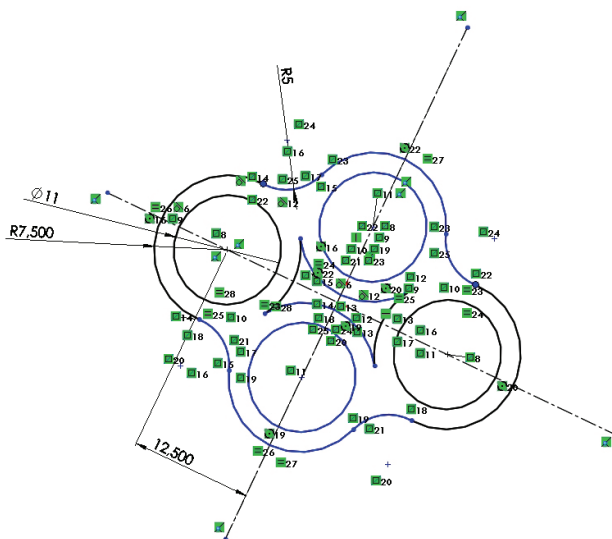
konanego zgodnie z wymaganiami norm odniesienia [4, 8]. W celu zbadania tego problemu wykonano w oprogramowaniu SolidWorks dwa trójwymiarowe modele numeryczne kształtu przyrządów pomiarowych do określenia średnicy okręgu toczonego kół zestawów kołowych. Różnica między rozpatrywanymi modelami polega na uwzględnieniu w badaniach różnych przekrojów profili kabłąka (rys. 1 i 2). Wykonano symulację komputerową MES tych modeli pod obciążeniem grawitacyjnym („pod własnym ciężarem”) w różnych zamocowaniach i różnych położeniach, symulujących użytkowanie przyrządu. Celem wykonania symulacji było określenie przemieszczeń punktów elementów przyrządów pomiarowych.

Normy [4, 8] dotyczące przyrządów pomiarowych do pomiaru średnicy okręgu toczonego kół zestawów kołowych wymagają, aby konstrukcja kabłąka zapewniała odpowiednią sztywność przyrządu. Normy te uznają za niezbędne taką sztywność przyrządu i konstrukcji kabłąka, aby różnica (zmiana) wskazań przyrządu odwróconego (zespołem pomiarowym do góry) i pionowo zamocowanego za kabłąk, ze sprawdzaniem przyrządu pomiędzy końcówkami pomiarowymi i przy dodatkowym obciążeniu wysięgnika siłą 49 N, nie przekraczała 0,05 mm [4, 8]. W artykule przedstawiono wyniki symulacji MES przyrządów w położeniu pionowym oraz w położeniu bocznym poziomym.

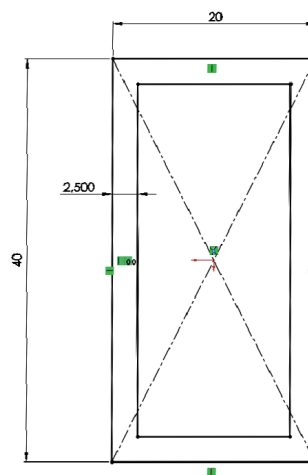
3. Wyniki badań

Symulację komputerową wykonano za pomocą metody elementów skończonych (MES) w programie SolidWorks. W założeniach opisu siatki przyjęto elementy typu TETRA czterowęzłowe, rozmiar siatki zmienny. W oprogramowaniu wybrano parametry siatki: siatka bryłowa oparta na krzywiznie, punkty jakobianu 4, jakość siatki „wysoka”. Jako warunki początkowe wybrano sposób zamocowania „nieruchoma geometria” przez co odebrano wszystkie 6 stopni swobody. Symulowany przyrząd w każdym badanym przypadku obciążono zewnątrz siłą pochodzącą od własnego ciężaru „grawitacja 9,81 m/s²” każdorazowo ustalając inny wybrany kierunek działania siły. Jako materiał przyrządu pomiarowego przyjęto stal walcowaną na zimno 1.0038 (PN: ST3S; EN: S235JR).

Do symulacji MES przyjęto modele 3D przyrządów do pomiaru średnicy okręgu toczonego kół zestawów kołowych z dwoma rodzajami przekrojów kabłąka: o przekroju ze spawanych czterech rurek cienkościennych o grubości ścianki 2,0 mm (wariant A przekroju, rysunek 1) i o przekroju prostokątnym profilu cienkościennego o grubości ścianki 2,5 mm (wariant B przekroju), rysunek 2.



Rys. 1. Przekrój kabłąka przyrządu do pomiaru średnicy okręgu toczonego kół zestawów kołowych zbudowany ze spawanych czterech rurek cienkościennych (wariant A przekroju) [opracowanie własne]



Rys. 2. Prostokątny przekrój kabłąka przyrządu do pomiaru średnicy okręgu toczonego kół zestawów kołowych (wariant B przekroju) [opracowanie własne]

Symulację komputerową wykonano w oprogramowaniu SolidWorks w module obliczeniowym MES Simulation. Symulacji poddano dwa modele 3D przyrządu, które różniły się rodzajem przekroju kabłąka (spawane rurki cienkościenne lub profil prostokątny) i były sztywno mocowane pionowo i poziomo, rysunki 3–18. Symulacja komputerowa była wykonana w dwóch miejscach mocowania przyrządu, w których odbierano sześć stopni swobody (nieruchoma geometria) – mocowanie na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego oraz mocowanie na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego. Przyjęto warunki brzegowe w przypadku odebrania 6 stopni swobody: translacja po osiach x , y i z , $T_x = 0$, $T_y = 0$, $T_z = 0$; rotacja względem osi x , y , z , $R_x = 0$, $R_y = 0$, $R_z = 0$.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowej w postaci mapy rozkładów przemieszczeń (statycznych przemieszczeń wypadkowych) punktów elementów modeli przyrządów pomiarowych do pomiaru średnicy okręgu tocznego kół zestawów kołowych obciążonego siłami grawitacyjnymi „pod własnym ciężarem” (rys. 3–18). W tablicach 1 i 2 przedstawiono zestawienia maksymalnych przemieszczeń punktów elementów przyrządów pomiarowych pod obciążeniem grawitacyjnym.

Tablica 1

Zestawienie wyników symulacji MES maksymalnych przemieszczeń punktów elementów przyrządów pomiarowych pod obciążeniem grawitacyjnym, mocowanie na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego

Sposób mocowania przyrządu	Rodzaj przekroju kabłąka	
	wariant A przekroju [mm]	wariant B przekroju [mm]
pionowo, zespołem pomiarowym do dołu	0,11	0,08
pionowo, zespołem pomiarowym do góry	0,11	0,08
poziomo, wybrzuszeniem kabłąka do góry	1,63	1,21
poziomo, wybrzuszeniem kabłąka do dołu	1,63	1,21

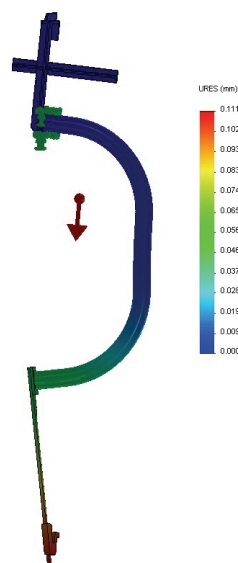
[Opracowanie własne]

Tablica 2

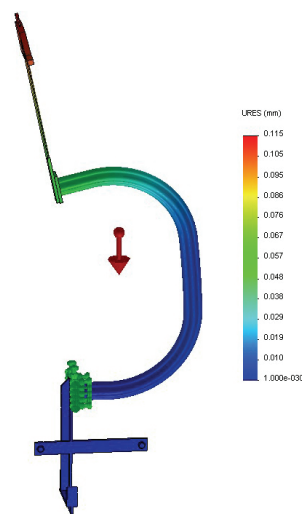
Zestawienie wyników symulacji MES maksymalnych przemieszczeń punktów elementów przyrządów pomiarowych pod obciążeniem grawitacyjnym, mocowanie na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego

Sposób mocowania przyrządu	Rodzaj przekroju kabłąka	
	wariant A przekroju [mm]	wariant B przekroju [mm]
pionowo, zespołem pomiarowym do dołu	2,64	2,16
pionowo, zespołem pomiarowym do góry	2,64	2,16
poziomo, wybrzuszeniem kabłąka do góry	13,04	11,67
poziomo, wybrzuszeniem kabłąka do dołu	13,04	11,67

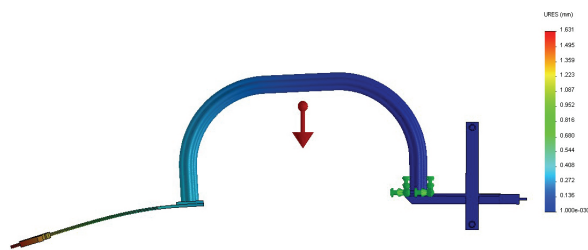
[Opracowanie własne]



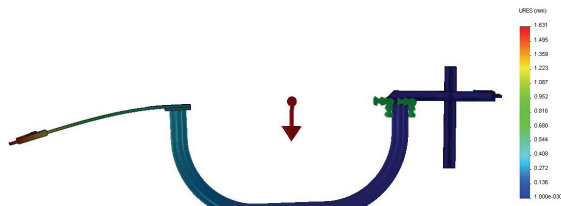
Rys. 3. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do dołu, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



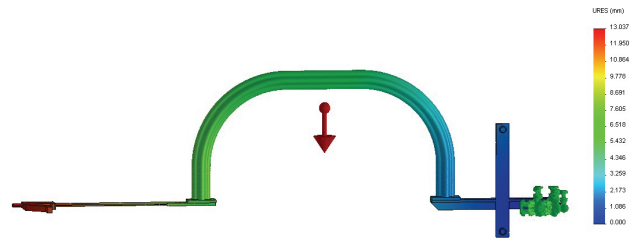
Rys. 4. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do góry, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



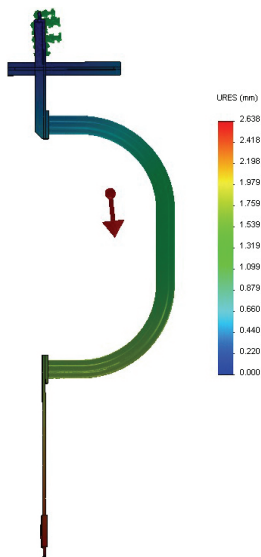
Rys. 5. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybruszeniem kabłąka do dołu, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



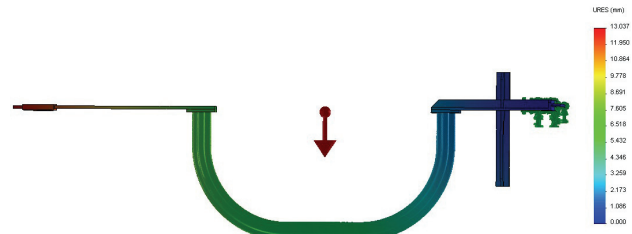
Rys. 6. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do dołu, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



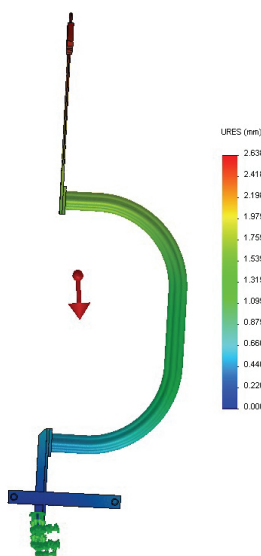
Rys. 9. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do góry, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



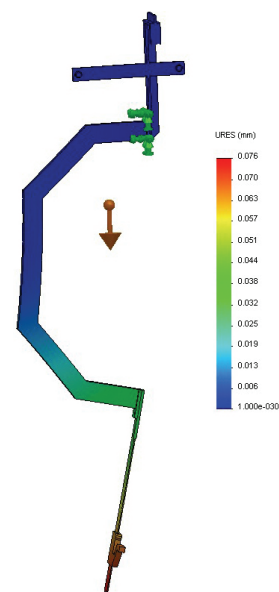
Rys. 7. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do dołu, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



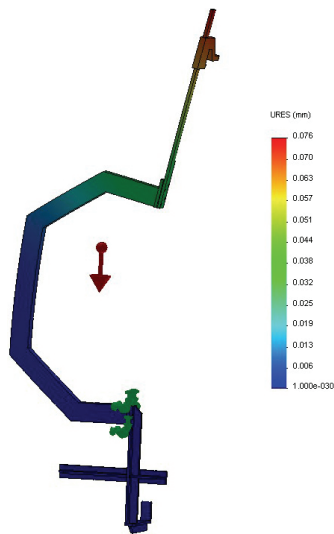
Rys. 10. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do dołu, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



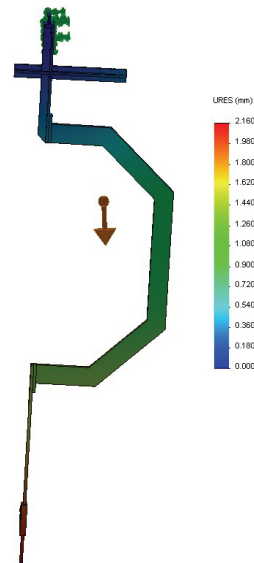
Rys. 8. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do góry, wariant A przekroju kabłąka [opracowanie własne]



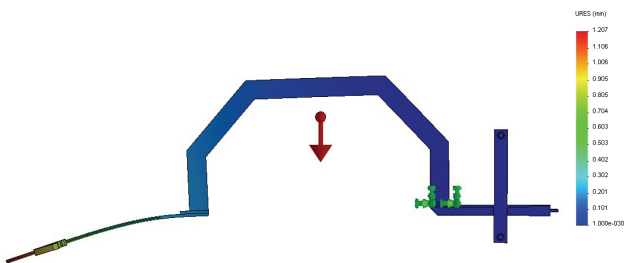
Rys. 11. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do dołu, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



Rys. 12. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do góry, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



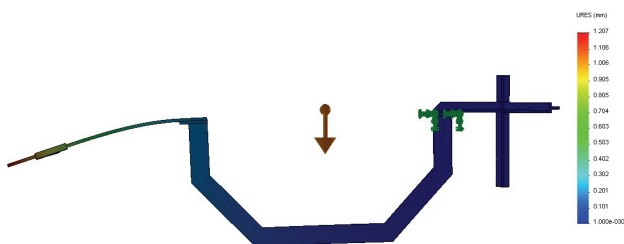
Rys. 15. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do dołu, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



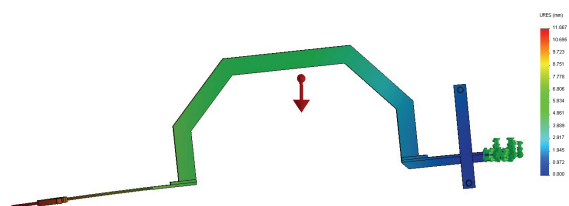
Rys. 13. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do góry, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



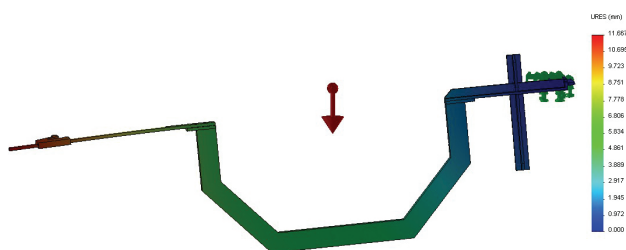
Rys. 16. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego pionowo zespołem pomiarowym do góry, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



Rys. 14. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do dołu, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



Rys. 17. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do góry, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]



Rys. 18. Wyniki uzyskane z symulacji przemieszczeń poszczególnych punktów elementów przyrządu zamocowanego na końcu przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego poziomo wybrzuszeniem kabłąka do dołu, wariant B przekroju kabłąka [opracowanie własne]

Zgodnie z normami [4, 8] i akredytowaną przez Polskie Centrum Akredytacji i stosowaną w Laboratorium Metrologii Instytutu Kolejnictwa procedurą pomiarową [7], przyrząd pomiarowy jest wzorcowany w pozycji leżącej płasko na boku, z powierzchniami pomiarowymi skierowanymi do góry, z użyciem wywzorcowanych wzorców końcowych nastawczych, będących w nadzorze zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 [6]. W tej pozycji jest również ustalane z użyciem wzorca położenie zerowe czujnika przyrządu.

Zmiana, spowodowana podniesieniem wywzorcowanego, leżącego płasko przyrządu pomiarowego i zawieszeniem go pionowo do góry lub pionowo w dół za kabłąk, powoduje przemieszczenie końca listwy pomiarowej o 0,1 mm. Jak wskazują wyniki symulacji, w przypadku zamocowania za koniec przyrządu pomiarowego, przemieszczenie końca listwy pomiarowej wyniesie 2,6 mm. Przy zamocowaniu przyrządu poziomo za koniec kabłąka lub za koniec przyrządu (w praktyce rzadko spotykany przypadek), przemieszczenie końca listwy pomiarowej wynosi 1,6 mm lub odpowiednio 13,0 mm. Są to znaczące wartości przemieszczeń, przekraczające dopuszczalne wartości pomiarów, do których przyrząd jest stosowany. Na przykład, gdy przyrząd używany jest do określenia różnicy średnic na okręgu tocznym tarcz kół zestawu kołowego, dopuszczalna wartość maksymalna wynosi 0,5 mm.

Przemieszczenie niezamocowanego końca kabłąka zawieszono pionowo przyrządu pomiarowego, określone na podstawie rysunków 3–6 oraz rysunków 11–14, wynosi odpowiednio 0,04 mm (przekrój z czterech rurek cienkościennych, wariant A przekroju) i 0,06 mm (przekrój z prostokątnego profilu cienkościennego, wariant B przekroju). W przypadku zamocowania przyrządu poziomo za koniec kabłąka, ugięcie kabłąka wynosi odpowiednio 0,3 mm (wariant A przekroju) i 0,2 mm (wariant B przekroju). Zestawienie maksymalnych przemieszczeń niezamocowanego końca kabłąka przyrządów pomiarowych

pod obciążeniem grawitacyjnym przedstawiono w tabelicy 3.

Tablica 3

Zestawienie wyników symulacji MES maksymalnych przemieszczeń końca kabłąka przyrządów pomiarowych pod obciążeniem grawitacyjnym, mocowanie na końcu kabłąka przyrządu pomiarowego od strony przeciwnej do zespołu pomiarowego

Sposób mocowania	Rodzaj przekroju kabłąka	
	wariant A przekroju [mm]	wariant B przekroju [mm]
pionowo, zespołem pomiarowym do dołu	0,06	0,04
pionowo, zespołem pomiarowym do góry	0,06	0,04
poziomo, wybrzuszeniem kabłąka do góry	0,30	0,20
poziomo, wybrzuszeniem kabłąka do dołu	0,30	0,20

[Opracowanie własne]

4. Podsumowanie i wnioski

Podczas wykonywania pomiarów przyrządem do pomiaru średnicy okręgu tocznego kół zestawów kołowych uzyskiwano niejednoznaczne wyniki pomiaru średnicy [1]. Przemieszczenia powierzchni pomiarowych przyrządu w symulacjach MES przyjmują dość duże wartości. Są one znaczące, jeśli przyrząd używany jest do określenia różnicy średnic na okręgu tocznym tarcz zestawu kołowego, o dopuszczalnej wartości maksymalnej 0,5 mm. Ujawnią się one, zwłaszcza gdy pomiary będą wykonywane w odmienny sposób przez różne osoby wykonujące pomiar.

Wyniki symulacji komputerowej potwierdzają małą, niewystarczającą sztywność kabłąka przyrządu i wskazują na potrzebę wprowadzenia zmian w konstrukcji przyrządu w celu zwiększenia sztywności istniejących przyrządów pomiarowych do pomiaru średnic okręgu tocznego kół zestawów kołowych.

W dalszych pracach należy walidować metody pomiarów średnicy okręgu tocznego, mierząc ją różnymi przyrządami pomiarowymi. Należy sprawdzić, jaki sposób wykonywania pomiarów i jaki sposób trzymania przyrządów podczas pomiarów jest prawidłowy i wprowadzić je do stosowania u użytkowników. Niezbędne jest przeprowadzenie dalszych badań symulacyjnych w celu np. doboru nowych materiałów konstrukcyjnych do wykonania przyrządu, w szczególności kabłąka, doboru innych zmiennych przekrojów i kształtów kabłąka przyrządu pomiarowego.

Literatura

1. Aniszewicz A., Bartoszek M.: *Problemy z pomiarem średnicy na okręgu tocznym zestawów kołowych*, Mechanik, nr 11/2016, s. 1720–1721.
2. Bąk R., Czapliński R.: *Pomiary zestawów kołowych*, Przegląd Kolejowy Mechaniczny, nr 5 (1972), s. 136–150.
3. Bińkowski R., Kowalczyk D.: *Analiza przyczyn uszkodzeń zestawów kołowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych*, Problemy Kolejnictwa, zeszyt nr 175, Warszawa 2017, s. 47–52.
4. BN-82 3509-13:1982: Wagony i tendry normalnotorowe. Przyrząd czujnikowy do pomiaru średnicy na okręgu tocznym kół zestawów.
5. PN-EN 13260+A1:2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Zestawy kołowe. Wymagania dotyczące wyrobu.
6. PN-EN ISO/IEC 17025:2005 + AP1:2007 + AC:2007: Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
7. PP-LMM-18: Wzorcowanie przyrządów do pomiaru średnicy okręgu tocznego kół zestawów kołowych, wersja 1 z dnia 24.04.2017 r. Akredytowana przez Polskie Centrum akredytacji procedura pomiarowa stosowana w Laboratorium Metrologii Instytutu Kolejnictwa, nr akredytacji PCA: AP 024.
8. ZN-00/PKP-3509-09:2000: Norma zakładowa. Tabor kolejowy. Przyrząd do pomiaru średnicy tocznej kół.