

## **Analytical studies, numerical MES and bench tests of the strength of a rail vehicle axles**

### **Badania analityczne, numeryczne MES i doświadczalne wytrzymałości osi pojazdu szynowego**

*The article presents a strength analysis of a rail vehicle axle based on bench, analytical and numerical tests. A numerical model was developed with the Finite Element Method. The effect of the finite element type used for calculation purposes on the result of numerical examination was checked. The obtained results were listed and compared.*

*W artykule przedstawiono analizę wytrzymałościową osi pojazdu szynowego na podstawie wyników badań stanowiskowych, analitycznych oraz numerycznych. Opracowano model numeryczny Metody Elementów Skończonych. Sprawdzono wpływ zastosowanego rodzaju elementu skończonego na wynik badania numerycznego. Porównano oraz zestawiono otrzymane wyniki.*

#### **1. INTRODUCTION**

Train transport of XXI century is still significant mean of passenger and freight transport despite constant and dynamic development of road, air and waterway communication. This may result from expensive use of trucks in result of rising fuel prices as well as busy and congested streets of many cities.,

Design of a wheelset is extremely important and significant from a technical point of view, since train safety is affected mainly by its proper production process and assembly. This, in turn, has direct consequences on the safety of travelers. Mainly for this reason, it is important to design this assembly in a precise and detailed way, to carry out correct and accurate strength calculation of the considered vehicle part.

#### **2. DESCRIPTION OF THE AXLE**

The wheelset axles are basic parts of a rail vehicle. Among many assemblies, they are most exposed to fatigue wear. Due to the high significance of the axle for the entire vehicle, only the selected, properly machined and heat-treated materials are used in its manufacture process. Most of the axles have standardized shape and dimensions and are made of a standardized material. The object of the research described in the present paper is the trailing axle of A-type wheelset (PN-92 / K-91048) [3] whose scheme and dimensions are shown in the figure below (Fig.1).

Due to discontinuity of the axle shape and the forces of variable direction and value acting on it, the material is subjected to considerable fatigue wear and local stress concentrations

The research was carried out with the use of the wheelset shown in Figure 2.

#### **1. WSTĘP**

Transport kolejowy w XXI wieku jest nadal znaczącym środkiem komunikacji osób i przewozu towarów, mimo nieustannego i dynamicznego rozwoju transportu samochodowego, lotniczego oraz wodnego. Może to wynikać z drogiej eksploatacji samochodów ciężarowych na skutek wciąż rosnących cen paliwa oraz zatłoczonych i zakorkowanych ulic wielu miast.

Konstrukcja zestawu kołowego jest niezwykle istotna i ważna z technicznego punktu widzenia, bowiem to od jego poprawnego wykonania i zamontowania głównie zależy bezpieczeństwo jazdy pociągu, co przekłada się bezpośrednio na bezpieczeństwo osób podróżujących. Głównie z tego względu ważne jest, aby w sposób dokładny i szczegółowy zaprojektować ten zespół konstrukcji oraz precyzyjnie i poprawnie wykonać obliczenia wytrzymałościowe omawianej części pojazdu.

#### **2. OPIS BADANEJ OSI**

Osie zestawów kołowych są podstawowymi częściami pojazdu szynowego. Spośród wielu zespołów są najbardziej narażone na zużycie zmęczeniowe. Ze względu na dużą odpowiedzialność osi w konstrukcji całego pojazdu, do jej wyrobu stosuje się wybrane materiały, odpowiednio obrobione mechanicznie oraz cieplnie. Większość osi jest wykonana ze znormalizowanego materiału, ma znormalizowany kształt oraz wymiary. Obiektem badań opisanym w niniejszym artykule jest oś toczna zestawu kołowego typu A (PN-92/K-91048) [3], której schemat wraz z wymiarami przedstawiono na rys. 1.

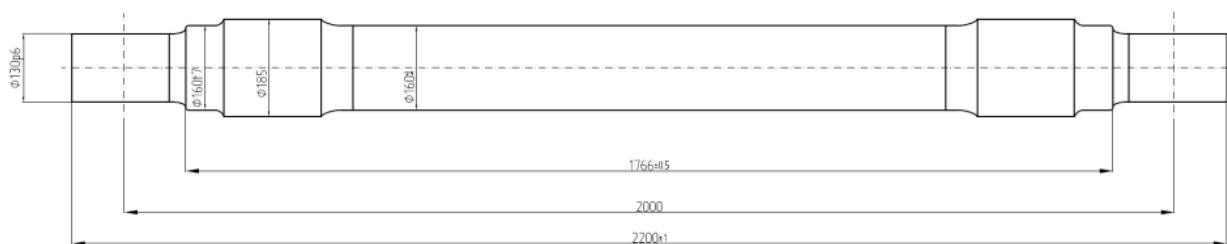


Figure 1. A-axle dimensions [3]

Rys. 1. Wymiary osi typu A [3]

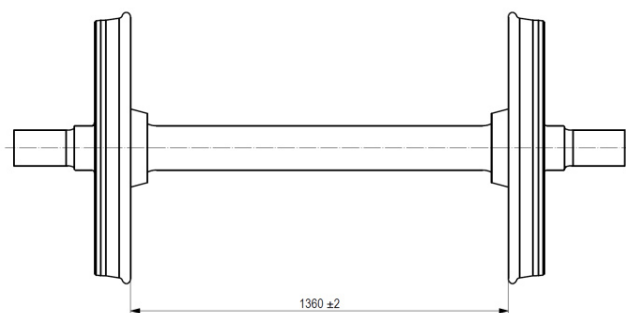


Figure 2. The wheelset used in the tests

Rys. 2. Zestaw kołowy wykorzystany podczas badań

Table 1. Strains and stresses occurring at the points of the strain gauges

Tablica 1. Odkształcenia i naprężenia występujące w punktach umiejscowienia tensometrów

Nr tensometru	Odległość [mm]	Odkształcenia		Średnia amplituda	
		$\epsilon_{min}$	$\epsilon_{max}$	$\epsilon_{sr}$	$\sigma_a$
		[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[ $\mu\text{m/m}$ ]	[MPa]
1 os	300	585,5	596,05	590,775	122
2 os	250	608,37	619,48	613,925	127

### 3. ANALYTICAL CALCULATIONS

The analytical calculation consist in examining the axle in accordance with the European Standard EN 13103: 2013 + A2 [1]. By default, calculations are carried out with consideration of two types of forces coming from the mobile masses and braking. The stress concentration is checked in the axle cross-sections that are most exposed to overload. However, for the sake of comparison with other test methods, two cross-sections were analyzed analytically, in which the strain gauges were located during the bench test.

Allowable stress values are presented in Table 1. The values have been selected according to the European Standard EN 13103: 2013 + A2 [1] and they result from the fatigue limit for bending of rotating axle. The standard takes into account the safety factor  $S = 1.2$  and the fact that the measuring points are located outside the wheel assembling areas.

Ze względu na nieciągłość kształtu osi oraz działające siły o zmiennym kierunku i wartości, występuje duże zmęczenie materiału, a także miejscowe spiętrzenia naprężeń.

Do badania zastosowano zestaw kołowy przedstawiony na rys. 2.

### 3. BADANIA STANOWISKOWE

Badania doświadczalne zostały wykonane w Laboratorium Badań Pojazdów Szynowych na stanowisku przeznaczonym do badań wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawów kołowych, której zasada działania została szczegółowo przedstawiona w podręczniku akademickim [2]. W celu zbadania osi do laboratorium została dostarczona próbka w formie półzestawu, który składał się z osi oraz tylko jednego włożonego koła. Koło zostało włożone na oś z zachowaniem normalnie stosowanych tolerancji i sił. Podczas badania oś została zamocowana pionowo do korpusu maszyny zmęczeniowej, a koło toczne osadzone na osi zamontowane zostało specjalnymi uchwytami kotwicznymi. Próbka została także obciążona siłami  $P_1$  i  $P_2$  o wartościach odpowiednio: 37,4 i 81,0 [kN]. Badania obejmowały wykonanie próby zmęczeniowej w zakresie 10 milionów cykli oraz badania tensometryczne w celu określenia naprężeń i kontroli obciążeń w trakcie próby zmęczeniowej. Pomiar tensometryczne należą do metod doświadczalnych pomiarów odkształceń na powierzchni badanego elementu. Środki tensometrów elektrooporowych znajdowały się odpowiednio w odległości 300 („1 os”) i 250 („2 os”) [mm] od środka koła.

Table 2. Maximum permissible stresses for full axles [1]

Tablica 2. Maksymalne naprężenia dopuszczalne dla osi pełnych [1]

Typ stali	$\sigma_{dop}$	$\sigma_{dop} S=1,2$
	[MPa]	[MPa]
EA1N	<200	<166

Dla badanego materiału przyjęto następujące właściwości materiałowe:

- moduł Younga:  $E = 210\,000$  [MPa],
- liczba Poissona:  $\nu = 0,3$ .

Dane wejściowe potrzebne do obliczeń zostały podane w tablicy 3 i oznaczone kolorem niebieskim. Siły na

Table 3. Summary of the results

Tablica 3. Zestawienie wyników

	Oznaczenie/Wzór	Wartość	Jednostka
Siła na pulsatorze górnym	$P_1$	37,40	kN
Siła na pulsatorze dolnym	$P_2$	-81,00	kN
Promień toczny koła	$R$	0,46	m
Odległość osi pulsatora górnego do środka koła	$L_g$	1,74	m
Odległość osi pulsatora dolnego do środka koła	$L_d$	0,26	m
Moment górny w środku szerokości wieńca koła	$M_g = P_1 \cdot L_g$	65,15	kNm
Moment dolny w środku szerokości wieńca koła	$M_d = P_2 \cdot L_g$	-20,90	kNm
Moment wprowadzony w tarczę koła	$M_t = M_g - M_d$	86,05	kNm
Siła na obrzeżu koła	$P_t = \frac{M_t}{R}$	187,06	kN
Odległość środka koła od tensometru „2os” na osi	$L_{i1}$	0,25	m
Odległość środka koła od tensometru „1os” na osi	$L_{i2}$	0,30	m
Średnica osi za kołem	$d$	0,160	m
Wskaźnik wytrzymałości	$W = \pi \cdot \frac{d^3}{32}$	0,000402	m <sup>3</sup>
Moment gnący oś w miejscu tensometru „2os”	$M_1 = P_1 (L_g - L_{i1})$	55,80	kNm
Moment gnący oś w miejscu tensometru „1os”	$M_2 = P_1 (L_g - L_{i2})$	53,93	kNm
Naprężenia w osi w miejscu tensometru „2os” <166	$S_1 = \frac{M_1}{W \cdot 1000}$	139	MPa
Naprężenia w osi w miejscu tensometru „1os” <166	$S_2 = \frac{M_2}{W \cdot 1000}$	134	MPa

The following material properties were adopted for the tested material:

- Young's modulus:  $E = 210\,000$  MPa;
- Poisson's ratio:  $\nu = 0.3$ .

The input data necessary for the calculation are specified in Table 3 and marked in blue. The forces on both pulsators were chosen in accordance with the applicable standard EN 13103: 2013 + A2 [1].

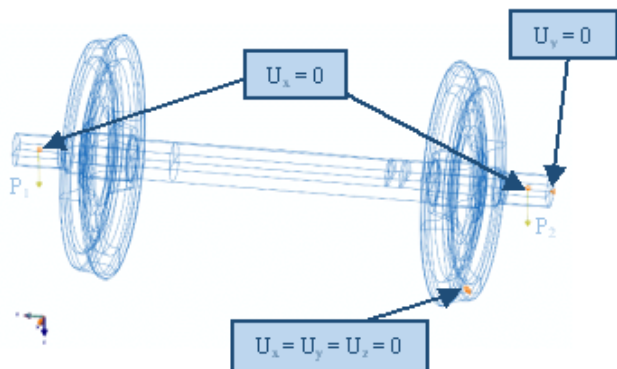


Fig. 3. Diagram of boundary conditions of the tested object  
Rys. 3. Schemat warunków brzegowych badanego obiektu

obu pulsatorach zostały dobrane zgodnie z obowiązującą normą EN 13103:2013+A2 [1].

## 5. MODEL OBLICZENIOWY

Model obliczeniowy wykonano na podstawie rysunków konstrukcyjnych [3] i wprowadzono także drobne uproszczenia, tak by można było sprawdzić właściwości różnych elementów skończonych. Obciążono go obciążeniami odpowiadającymi tym, które zostały wprowadzone podczas badania stanowiskowego. W celu odwzorowania rzeczywistych podparć, wprowadzono odpowiednie warunki brzegowe przedstawione na rys. 3.

## 6. DYSKRETYZACJA MODELU

Metoda Elementów Skończonych cechuje się tym, że aby rozwiązać zadanie matematyczne, musimy dokonać dyskretyzacji zagadnienia. Sprawdzone jak dobór elementów geometrycznych wpłynie na otrzymywane wyniki podczas badania osi pojazdu szynowego metodą numeryczną. Program Abaqus/Standard, w którym wykonano obliczenia posiada rozbudowaną bibliotekę elementów skończonych. Można tam znaleźć zarówno

## 5. COMPUTATIONAL MODEL

The computational model was developed based on the structural drawings [3]. Some minor simplifications were introduced so as to allow to check the properties of various finite elements. The loads equal to those introduced during the bench test were applied to it. In order to map the actual supports, appropriate boundary conditions shown in Fig. 3 were imposed.

## 6. MODEL DISCRETIZATION

Finite Element Method is distinguished by the fact that in order to solve a mathematical problem the discretization of the object is necessary. A check was carried out how the selection of geometric elements affects the

elementy tetragonalne jak i heksagonalne. Oba rodzaje występują w wersji kwadratowej oraz liniowej. Dyskretyzacja osi elementami heksagonalnymi wymagała podziału badanego obiektu na pod-bryły o prostszej geometrii ze względu na skomplikowany kształt, bez tego nałożenie siatki byłoby niemożliwe. W przypadku elementów tetragonalnych proces dyskretyzacji jest o wiele prostszy, gdyż nie wymaga on dodatkowego wyodrębnienia pod-brył. Po analizie siatki oraz rozmieszczenia elementów wzdłuż linii pomiarowej zastosowano globalny rozmiar elementu równy 10 mm oraz stwierdzono, że najlepszą jakością cechuje się siatka tetragonalna, co widać na rys. 4.

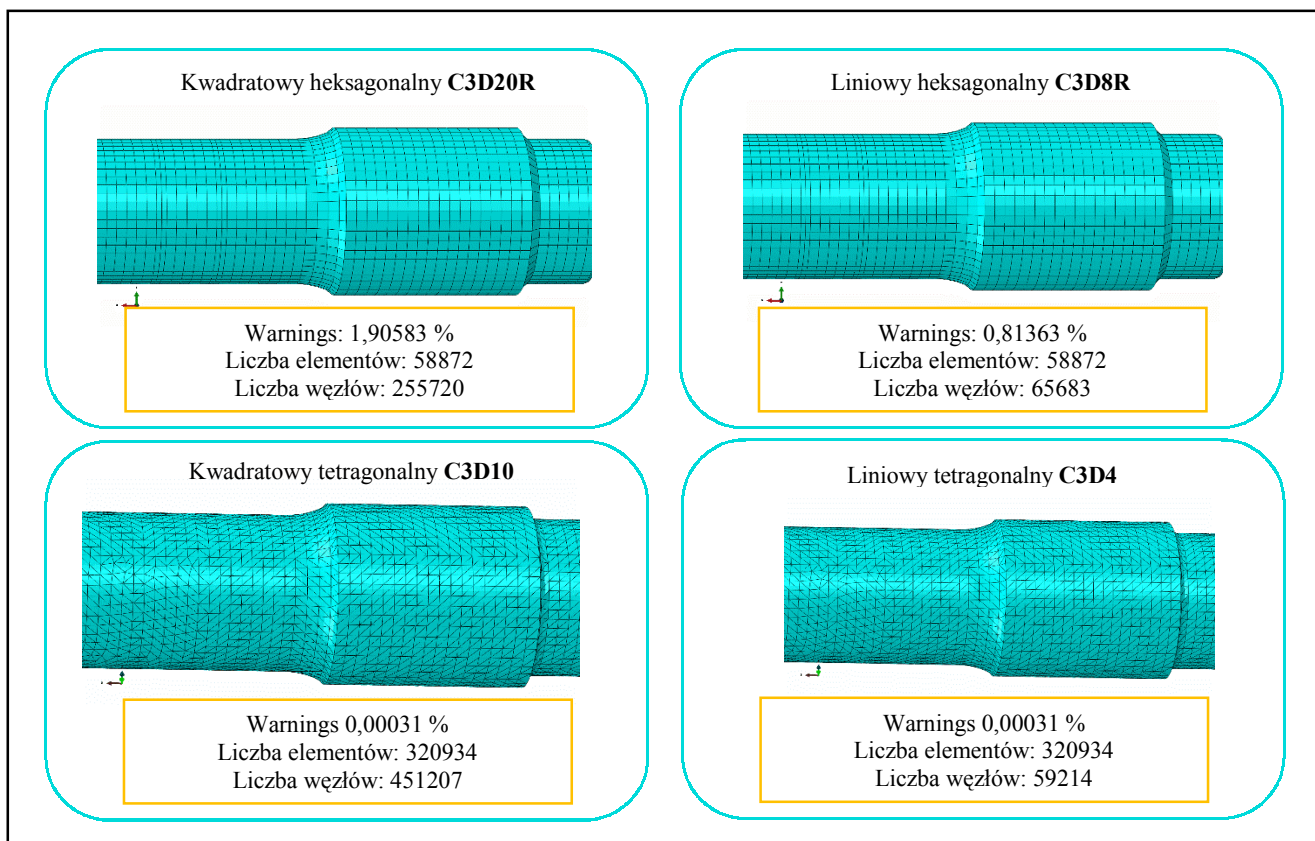


Fig. 4. Division of the axle into finite elements with consideration of the mesh quality

Rys. 4. Podział osi na elementy skończone z uwzględnieniem jakości siatki.

results obtained during examination of the rail vehicle axle with numerical method. The Abaqus/Standard program used for calculation purposes has an extensive library of finite elements. It includes both tetragonal and hexagonal elements, available in square and linear versions. In order to discretize the axle into hexagonal elements their complex shape enforces preliminary division of the considered object into sub-bodies of simpler geometry. Otherwise, the mesh of the elements could not be applied to the axle. In case of tetragonal elements discretization is much faster as the sub-bodies do not have to be defined. Analysis of the grid and location of the elements along the measurement line allowed to apply the elements of global size equal to 10 mm. It was found that tetragonal mesh is the best, as shown in Figure 4.

Po wykonaniu obliczeń uzyskano rozkłady naprężeń Hubera-Misesa przedstawione na rys. 5. Choć wyniki otrzymane w miejscu zamontowania tensometrów nie różnią się między sobą diametralnie, to warto zauważyć, że naprężenia powstałe na osi z zastosowaną siatką kwadratową tetragonalną idealnie odwzorowują naprężenia uzyskane metodą analityczną.

## 7. PODSUMOWANIE

Otrzymane wartości naprężeń (tablica 4) nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych, a co więcej otrzymane wyniki z badań numerycznych opartych na Metodzie Elementów Skończonych i badań analitycznych są niemal identyczne, co świadczy o poprawności ustalenia warunków brzegowych oraz obciążeń przy analizie komputerowej. W metodzie stanowiskowej uzyskano



The computation provided the Huber-Mises stress distributions shown in Figure 6.2. Although the results obtained in the locations of the strain gauges are not radically different, it should be noticed that the stresses arising in the axle calculated with the mesh composed of tetragonal square elements perfectly match the stresses obtained by analytical method.

naprężenia mniejsze o ok. 10 [MPa] niż oczekiwano. Może to wynikać z tolerancji wymiarów średnic osi. Oś przyjęta do obliczeń analitycznych oraz numerycznych posiadała wymiary nominalne, natomiast wartości wymiarów osi rzeczywistej mogły się lekko różnić, zgodnie z założonymi w normie [3] tolerancjami.

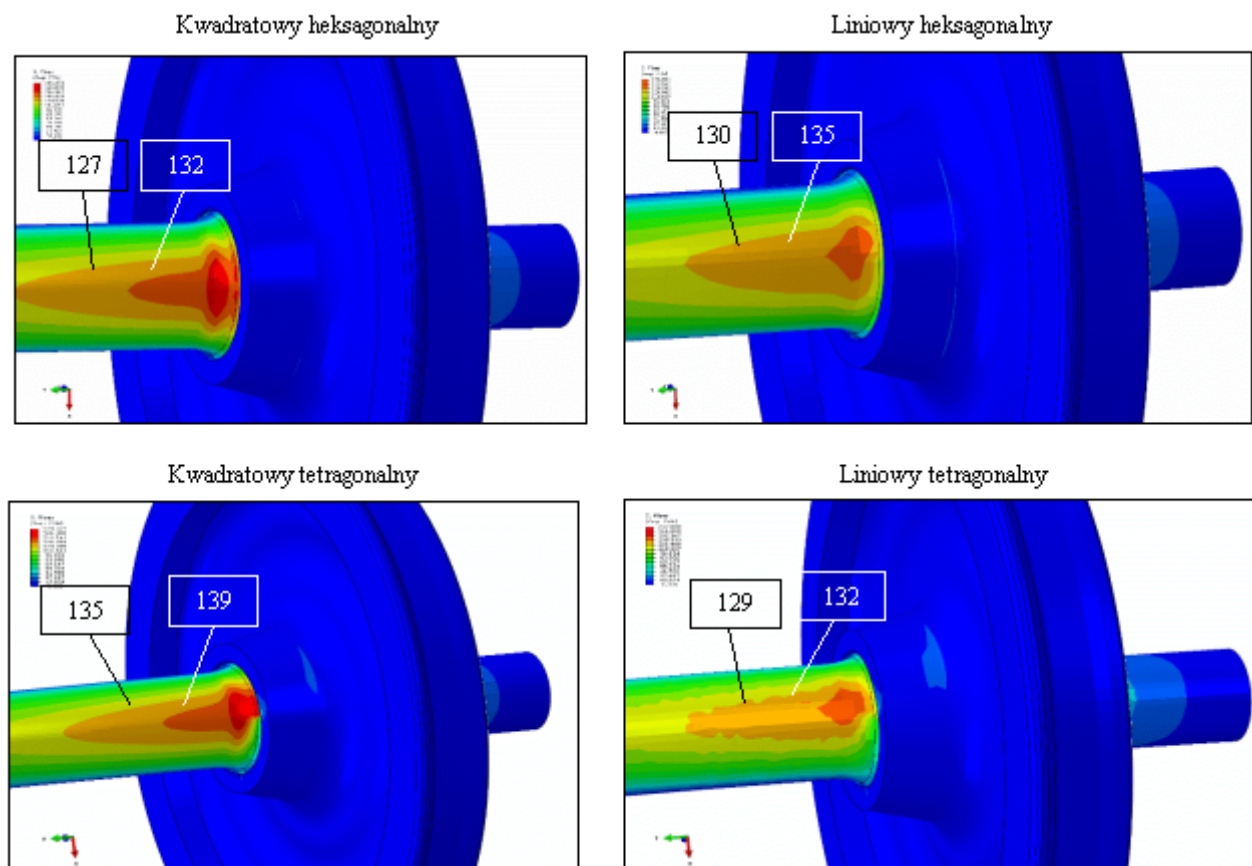


Fig. 5. Distributions of equivalent stresses

Rys. 5. Rozkłady naprężeń zredukowanych

## 7. SUMMARY

The obtained stress values (Tab.4) do not exceed the allowable level. Moreover, the results obtained in numerical approach based on Finite Element Method and in analytical tests are almost identical. This gives evidence for correct definition of boundary conditions and loads adopted in computer analysis. In case of the bench tests the stresses were lower by approx. 10 MPa as compared to the expected level. This may be due to the tolerance of the dimensions of axle diameters. The axle used for analytical and numerical calculations had nominal dimensions, while the values of actual axle dimensions could slightly differ, according to the tolerances assumed in the standard [3].

Analysis of the performed studies indicates that simulation tests, similarly to analytical ones, can be alternative to the experimental research, especially in initial designing stage of the rail vehicle axle. This saves a lot of time and electricity, and most importantly, in order to check the effects of structural modifications no further samples are necessary. Nevertheless, it should be noticed that before putting the object into operation the

Table. 4. Summary of the results obtained (1 – bench tests, 2 - analytical calculation, 3 – FEM numerical tests)

Tablica 4. Zestawienie otrzymanych wyników (1 – badania stanowiskowe, 2 – obliczenia analityczne, 3 – badania numeryczne MES)

Nr tenso- me- tru	Odle- głość	1	2	3	War- tość dopus- zczalna [1]
		$\sigma_a$	$\sigma_a$	$\sigma_a$	$\sigma_{dop}$
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1 os	300	124	134	135	166
2 os	250	129	139	139	166

Po przeanalizowaniu przeprowadzonych badań można stwierdzić, że badania symulacyjne tak samo jak analityczne mogą stanowić alternatywę dla badań doświadczalnych. Szczególnie w początkowej fazie projektowania osi pojazdu szynowego. Zaoszczędza to z pewnością czas oraz energię elektryczną, a co najważniejsze nie trzeba wykonywać nowej próbki dla sprawdzenia, jak wprowadzona modyfikacja może wpłynąć na

examination of several randomly chosen axles from the production batch should be carried out on a fatigue test bench, in order to verify correctness of the object. This is required since, despite numerous methods of checking the axle material, virtually undetectable material defects may exist, such as heterogeneity of the material crystal structure.

When designing an object in a program based on the Finite Element Method, particular attention should be paid to appropriate choice of finite elements during discretization of the model. In case of solid objects, tetragonal linear elements should not be used as they are distinguished by high stiffness. Square hexagonal elements are much better, however, their application to meshing a complex object is more time-consuming. In order to create such a mesh on the object considered in the present paper at least five sub-bodies of less complex form had to be created. Instead, the tetragonal square elements make a remarkable alternative since they can always be used, even for the most complex models. Moreover, they perfectly reflect actual stress values, as demonstrated in the above study.

#### **Bibliography / Literatura**

- [1] Norma Europejska EN 13103- 2012 +A2
- [2] Stasiak L., *Doświadczalna determinacja charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawu kołowego pojazdów szynowych, Rozprawy Nr 173, Politechnika Poznańska, Poznań 1986*
- [3] Norma Polska PN-92/K-91048

konstrukcję. Należy jednak pamiętać, że przed wprowadzeniem obiektu do eksploatacji konieczne jest przebadanie na stanowisku zmęczeniowym wybranych przypadkowo kilku osi z danej serii, w celu sprawdzeniu poprawności wykonania przedmiotu, ponieważ mimo licznych metod sprawdzających materiał osi, istnieją wady materiałowe praktycznie nie do wykrycia, takie jak niejednorodność kryształu materiału.

Projektując obiekt w programie opartym na Metodzie Elementów Skończonych należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiednie dobranie elementów skończonych podczas dyskretyzacji modelu. Do obiektów bryłowych nie należy dobierać elementów liniowych tetragonalnych, gdyż cechują się one dużą sztywnością. Elementy kwadratowe heksagonalne są znacznie lepsze, jednak są czasochłonne podczas nakładania siatki elementów na skomplikowany obiekt. W przedstawionym w artykule elemencie przy nakładaniu takiej siatki musiało zostać dodatkowo wyodrębnionych co najmniej pięć pod-brył o mniej skomplikowanym kształcie. Natomiast elementy kwadratowe tetragonalne są niezwykle alternatywą, ponieważ można je stosować zawsze, nawet na najbardziej skomplikowane modele. Co więcej, jak udowodniono w powyższych badaniach wspaniale odwzorowują one rzeczywiste wartości naprężeń.