

ZESZYTY STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

Porównanie wybranych materiałów stosowanych do produkcji felgi samochodowej

W. Słaboń^a, D. Krysiak^a, T. Tański^b

^a Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: w.slabon93@gmail.com, domingo90pl@gmail.com

^b Politechnika Śląska · Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: tomasz.tanski@polsl.pl

Streszczenie: Celem niniejszej pracy było wykonanie symulacji komputerowej modelu felgi, która miała na celu sprawdzenie możliwości zastosowania materiału na dany model felgi samochodowej. W realizacji zamierzonych działań skupiono się na trzech wybranych materiałach inżynierskich, w tym na: stali C45, stopie aluminium Ak9 oraz stopie magnezu AZ91. Materiały te porównano w celu wybrania najlepszego materiału pod względem własności wytrzymałościowych oraz użytkowych. Model felgi samochodowej wykonano w programie Solid Edge oraz przeprowadzono jego analizę wykorzystując metodę elementów skończonych.

Summary: The purpose of this work was to perform a computer simulation of the rim model, which was aimed at checking the possibility of applying material to a particular vehicle wheel model. Three selected engineering materials were selected for the project, including C45 steel, Ak9 aluminum alloy and AZ91 magnesium alloy. These materials were compared to select the best material for strength and utility properties. To accomplish this, a Solid Edge vehicle wheel model was performed and finite element method analysis was performed.

Słowa kluczowe: naprężenia mechaniczne, felga, metoda elementów skończonych (MES), Solid Edge

Key words: mechanical stress, rim, finite element method (FEM), Solid Edge

1. WPROWADZENIE

Felgi ze stopów lekkich są wykorzystywane w samochodach osobowych nie tylko ze względu na ich atrakcyjny wygląd i niższą wagę, ale również w celu zapewnienia lepszego chłodzenia tarcz hamulcowych oraz odprowadzania ciepła [4].

Felgi samochodów osobowych można podzielić z uwagi na materiał użyty do ich wykonania na [5]:

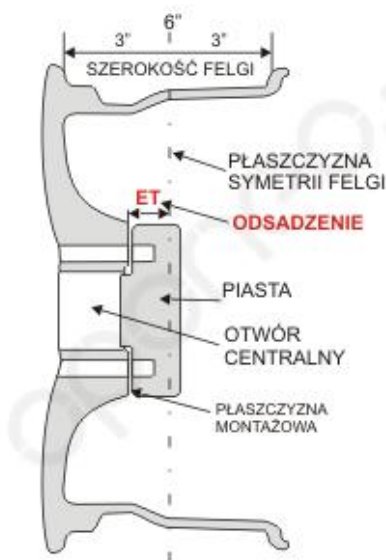
- stalowe.
- kompozytowe.

- ze stopów aluminium.
- ze stopów magnezu.

W ramach niniejszej pracy porównano wybrane materiały inżynierskie, tj. stal C45, stop aluminium Ak9 oraz stop magnezu AZ91 pod względem ich użyteczności do modelu felgi zaprojektowanej w programie Solid Edge ST9. W pracy ograniczono się do symulacji statycznych obciążeń wynikających z maksymalnej masy pojazdu, której wartość została przyjęta 600kg na koło oraz ciśnienia 2,5 Bar. W drugim aspekcie symulacji skupiono się na uwydatnieniu różnic w materiałach poprzez zadanie większego obciążenie o wartości 20kN.

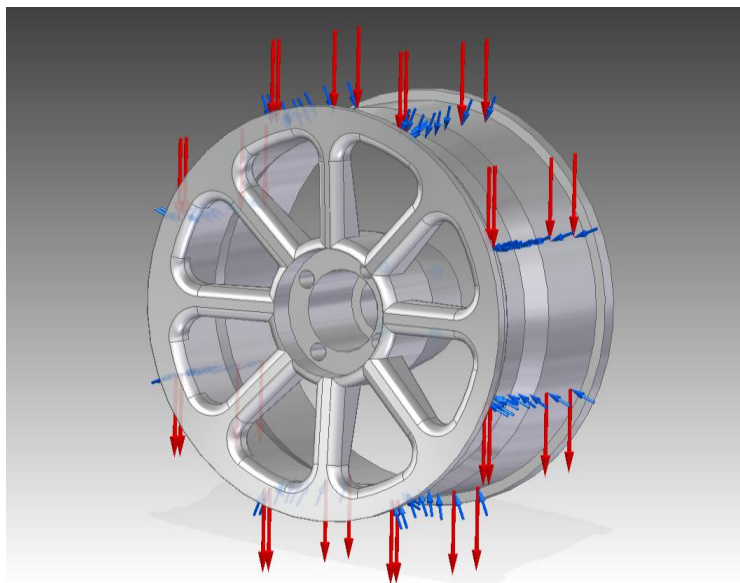
Model felgi został wykonany z uwzględnieniem danych:

- szerokość felgi: 7 cali.
- rozmiar felgi: 15 cali.
- odsadzenie et: 36 mm.
- otwór centrujący: 72mm.
- rozstaw otworów na śruby : 4x100.
- rozmiar śrub montażowych: M12x1,5.

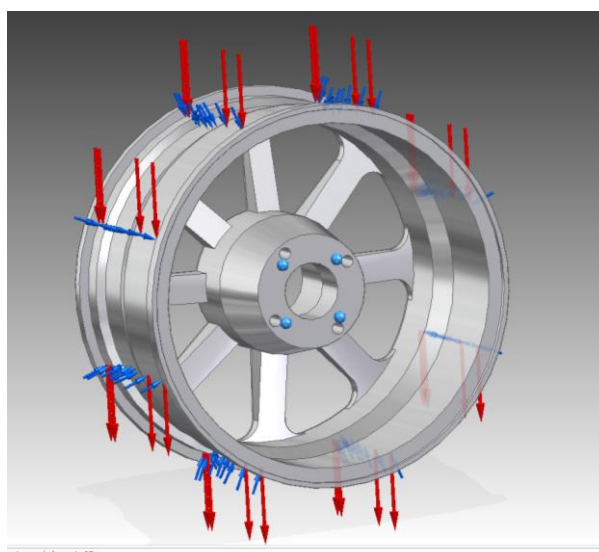


Rys 1. Dane felgi samochodowej [5]

Fig. 1. Car wheel data [5]



Rys. 2 Zewnętrzna część modelu felgi z nałożonym obciążeniem.
Fig.2 The outer part of the rim model



Rys. 3 Wewnętrzna część modelu felgi z nałożonym obciążeniem oraz miejscem odebrania punktów swobody.
Fig. 3 Inner part of rim model

Stal C45 jest materiałem stalowym niestopowym jakościowym do ulepszenia cieplnego, trudno spawalna oraz łatwa w obróbce plastycznej. Stosowana na średnio obciążone elementy maszyn i urządzeń, jak np.: osie, wały, piasty do kół i inne. Tego typu wyroby z łatwością mogą być hartowane powierzchniowo uzyskując twardość nawet do 60 HRC.

Odlewnicze stopy aluminium są stopami dwu- lub wieloskładnikowymi o dużej zawartości dodatków stopowych - od 5 do 20% - głównie są to Si, Cu, Mg lub Ni.

Dominującą grupę odlewniczych stopów Al stanowią stopy z dodatkiem Si, o składzie zbliżonym do eutektycznego. W zależności od zawartości Si i dodatków siluminy dzielimy na [1,4]:

- Podeutektyczne, zawierające od 4 do 10% Si.
- Eutektyczne, zawierające od 10 do 13% Si.
- Nadeutektyczne, zawierające od 13 do 30% Si.

Siluminy podeutektyczne i nadeutektyczne są zwykle wieloskładnikowe, oprócz dodatków krzemu zawierają również miedź (Cu), magnez (Mg), mangan (Mn) oraz nikiel (Ni), co pozwala obrabiać je cieplnie poprzez przesycanie oraz starzenie zwiększając ich wytrzymałość.

Odlewniczy stop aluminium Ak9 sztucznie utwardzany wydzieleniowo wyróżnia się wyższymi własnościami wytrzymałościowymi (R_m równa 240 MPa) w porównaniu do tego samego stopu bez obróbki utwardzenia wydzieleniowego (R_m równa 180 MPa).

Stopy magnezu charakteryzują się bardzo niską gęstością, która wynosi jedynie 1,74 g/cm³ czyniąc je jednym z najlżejszych materiałów konstrukcyjnych. Stopy magnezu wytwarzana są przede wszystkim z pierwiastkami stopowymi, takimi jak: aluminium, cynk, mangan, lit, srebro, cyna czy cyrkon. Najważniejszym dodatkiem w stopach magnezu jest aluminium, które zwiększa ich wytrzymałość na rozciąganie dzięki krystalizacji fazy międzymetalicznej Mg₁₇Al₁₂. Dodatek cynku i manganu zwiększa wytrzymałość, podobnie jak Al. Srebro zwiększa odporność w podwyższonej temperaturze, dodatek krzemu zwiększa wytrzymałość i sprężystość równocześnie zmniejszając ciągliwość stopu, natomiast cyrkon zapobiega wydzielaniu się węglików chromu po obróbce cieplnej lub spawaniu, a tym samym zapobiega korozji międzykrystalicznej. Jedną z największych wad magnezu i jego stopów jest jego niska odporność korozyjna, z tego też względu niezbędne jest zabezpieczenie tego materiału powłoką ochronną, wykonaną np. poprzez malowanie proszkowe, powłokami galwanicznymi, anodowaniem i inne [3].

Metoda elementów skończonych (MES) jest komputerową metodą wyznaczania naprężenia, odkształcenia, uogólnionych sił i przemieszczeń w analizowanej konstrukcji dowolnego rodzaju. Metoda ta opiera się na podziale układu modelu na konkretną, zdefiniowaną liczbę elementów skończonych. W obrębie każdego elementu dokonuje się pewnych aproksymacji, a niewiadome (takie jak np. przemieszczenie) są reprezentowane poprzez funkcje interpolacyjne za pomocą wartości tych funkcji w skończonej liczbie punktów, zwanych węzłami [2].

2. DOBÓR MATERIAŁU I METODYKI BADAWCZEJ

2.1 Wybór materiału

Do celów porównawczych zostały wybrane trzy materiały: stal C45, stop aluminium Ak9 oraz stop magnezu AZ91.

Tabela 1. Skład chemiczny stali C45 według normy EN 10083-2 [9]

Table 1. Chemical composition of C45 steel [9]

Stal	Skład chemiczny, %								
Oznaczenie	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
C45 (1.0503)	0,42-0,5	0,5-0,8	0,1-0,4	max 0,04	max 0,04	max 0,03	max 0,03	max 0,1	max 0,03

Tabela 2. Skład chemiczny stopu Aluminium Ak9 według normy PN-76/H-88027 [4]

Table 2. Chemical composition of aluminum alloys according to PN-76 / H-88027 [4]

Stop Aluminium	Skład chemiczny, %					
Oznaczenie	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn
Ak9 (AlSi9Mg)	8,5-10,5	0,3	0,25-0,4	0,25-0,5	0,15	0,2

Tabela 3. Skład chemiczny stopu Magnezu AZ91 według normy PN-EN 1753:2001 [8]

Table 3. Chemical composition of magnesium alloy AZ91 according to PN-EN 1753: 2001 standard [8]

Stop Magnezu	Skład chemiczny [%]		
Oznaczenie	Al	Zn	Mn
AZ91 (MgAl9Zn1)	8,1-9,3	0,4-1,0	0,17-0,35

W celu przeprowadzenia symulacji w programie Solid Edge zdefiniowano nowe materiały uwzględniające ich własności wytrzymałościowe.

Tabela 4. Własności wytrzymałościowe stopu Aluminium Ak9 według normy PN-76/H-88027, magnezu AZ91 według normy PN-EN 1753:2001 oraz stali C45 według EN10083-2 [6,8,9]

Table 4. Strength properties of aluminum alloy Ak9 according to PN-76 / H-88027, magnesium AZ91 according to PN-EN 1753: 2001 and C45 steel in EN10083-2 [6,8,9]

Właściwość	Ak9	C45	AZ91
Gęstość	2650 kg/m ³	7800 kg/m ³	1810 kg/m ³
Przewodność cieplna	0,170 kW/m-C	0,014 kW/m-C	0,840 kW/m-C
Ciepło właściwe	920 J/kg-C	440 J/kg-C	1000 J/kg-C
Moduł sprężystości	68947,57 MPa	210000,003 MPa	44000 MPa
Współczynnik Poissona	0,330	0,280	0,350
Granica plastyczności	200 MPa	580 MPa	170 MPa
Naprężenie niszczące	240 MPa	750 MPa	270 MPa

2.2 Metodyka

Do przeprowadzenia badania wytrzymałościowego wykorzystano narzędzie symulacji metodą elementów skończonych (MES) wchodzące w skład oprogramowania Solid Edge. Metoda ta pozwala sprawdzić model felgi, uwzględniając obciążenia jakie występują w feldze zamontowanej w samochodzie. W pierwszym wariantcie symulacji modelu zostaną zasymulowane wyłącznie siły statyczne działające na felgę podczas postoju auta. W niniejszej pracy uwzględniono siłę ciężaru samochodu z pełnym obciążeniem 2400kg, tzn. 600kg w rozliczeniu na każde koło. Jest to wartość dopuszczalnego obciążenia opony o indeksie nośności 91. Analiza wytrzymałościowa MES modelu felgi pozwala określić miejsca na feldze, w których występują największe naprężenia oraz określić czy zastosowany materiał jest wystarczająco wytrzymały. Do możliwości oprogramowania zalicza się również sprawdzenie czy granica plastyczności nie zostanie przekroczona (powinna być wyższa niż naprężenia w elemencie), z zachowaniem współczynnika bezpieczeństwa wynoszącego przynajmniej trzy krotność zakładanego obciążenia [7].

W pierwszym wariantcie symulacji felga została utwierdzona na powierzchni, która w samochodzie zostaje przykręcona śrubami do piasty. Siła została nałożona na obręcz felgi, w miejscu styku felgi z oponą, w kierunku Z – pionowym, zgodnie z założeniem dla samochodu ważącego w pełnym obciążeniu 2400kg. Siła działając na felgę wynosi 600kg co odpowiada w przybliżeniu 6 kN (w programie wprowadzona wartość to 6000000 mN).

Wykonano również drugi wariant symulacji gdzie zostało zwiększone obciążenie do 20kN, co pozwoliło na dokładniejsze porównanie własności materiałów zastosowanych na model felgi [7].

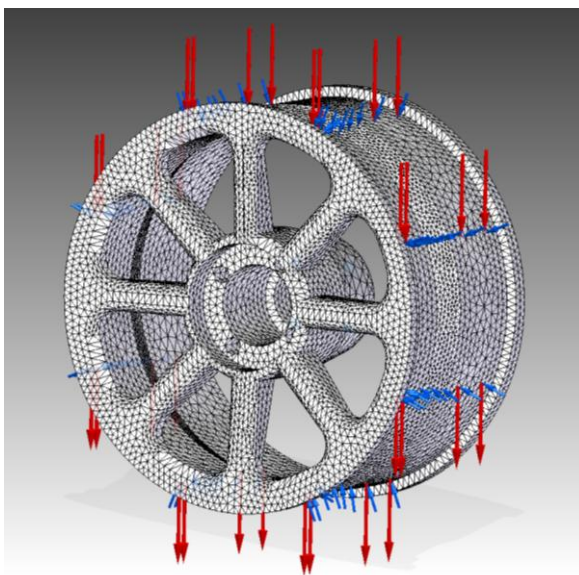
3. ANALIZY WYNIKÓW BADAŃ

Na model felgi została nałożona siatka elementów skończonych. Wszelkie jej dane zostały umieszczone w tabeli 5.

Tabela 5 Parametry siatki elementów skończonych

Table 5 Finite element mesh parameters

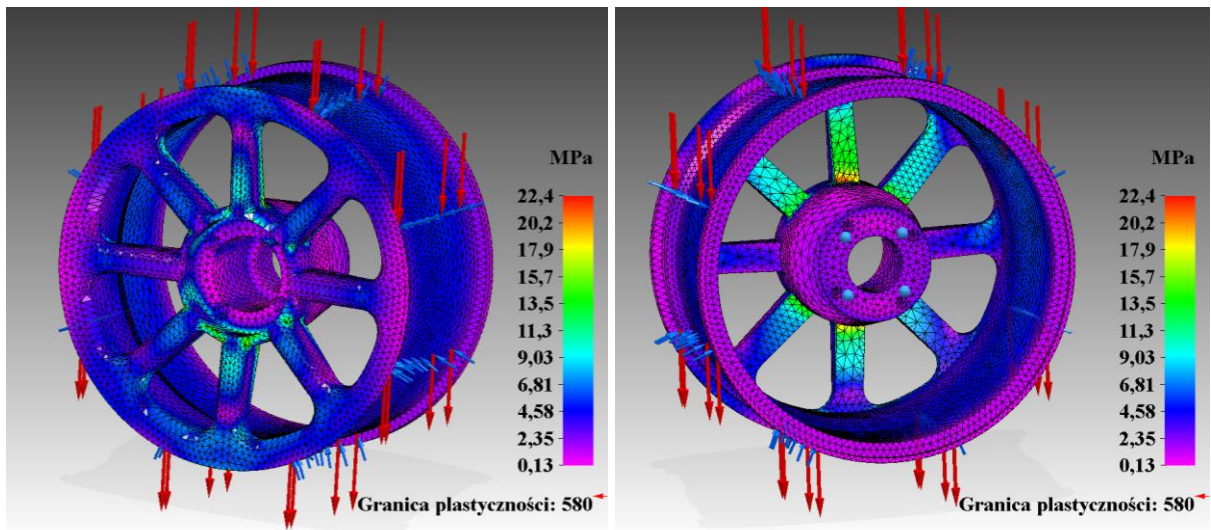
Typ siatki	Czworościenna
Łączna liczba obiektów z nałożoną siatką	1
Łączna liczba elementów	91 709
Łączna liczba węzłów	152 617
Subiektywny rozmiar siatki (1-10)	8



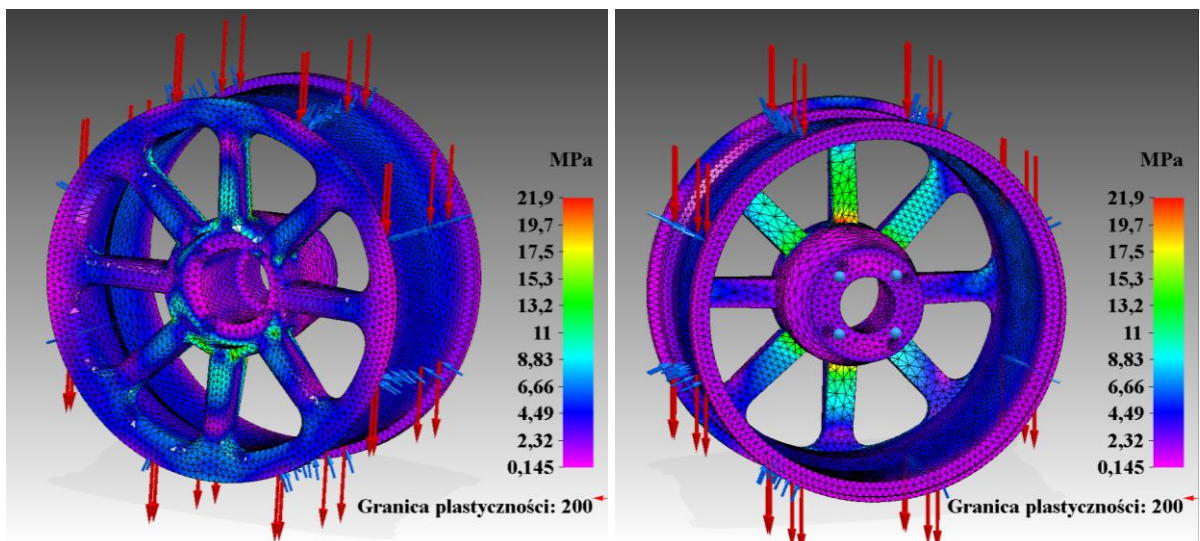
Rys.4 Model felgi z nałożoną siatką elementów skończonych

Fig.4 A rim model with a finite element mesh

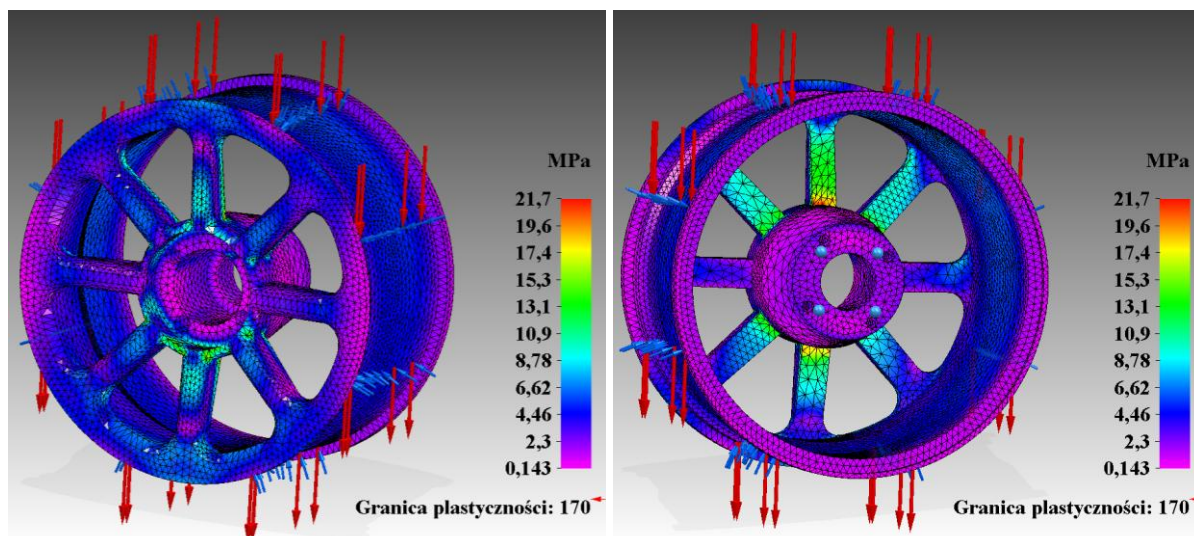
W zależności od bryły modelu, siatka jest dopasowywana do wielkości i kształtu obiektu, gdzie na krawędziach tworzone są mniejsze elementy skończone, w celu umożliwienia ich dokładniejszego rozpatrywania.



Rys. 5 Naprężenia zredukowane Von Misesa przy zastosowaniu Stali C45 dla obciążenia 6kN
Fig. 5 Von Misesa reduced stresses using Steel C45 for 6kN load



Rys. 6 Naprężenia zredukowane Von Misesa przy zastosowaniu stopu Aluminium Ak9 dla obciążenia 6kN
Fig. 6 Von Misesa reduced stresses using Ak9 aluminum alloy for 6kN load



Rys. 7 Naprężenia zredukowane Von Misesa przy zastosowaniu stopu Magnezy Az91 dla obciążenia 6kN

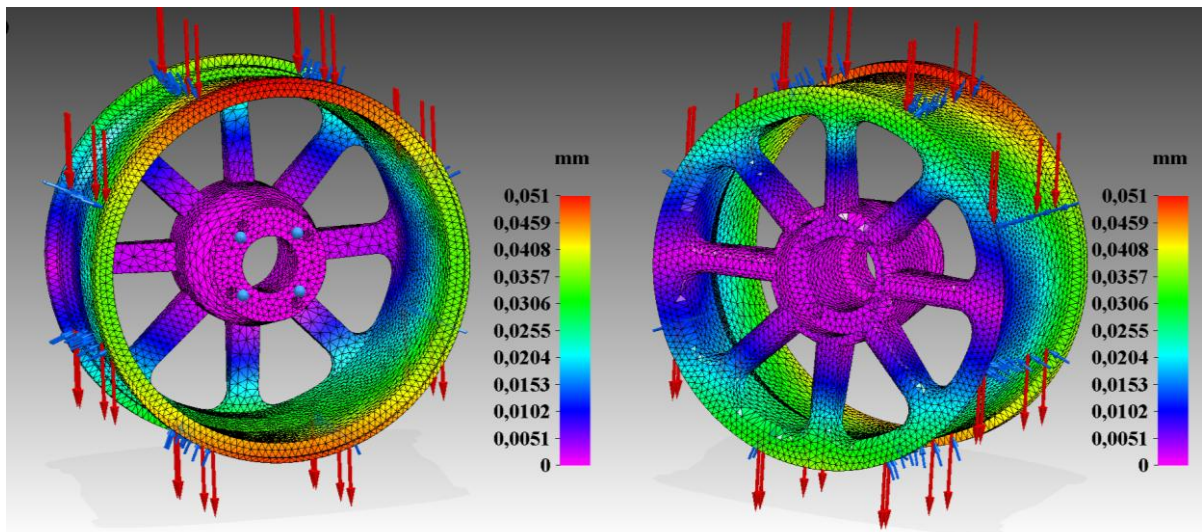
Fig. 7 Von Misesa reduced stresses using Azana magnesium for 6kN

Z powyższych symulacji z zastosowanym obciążeniem 6kN można odczytać że największe naprężenia występują w miejscu styku ramion ze środkową częścią felgi. Zwłaszcza w ramieniu, które jest równoległe do działającej siły. Naprężenia maksymalne wynoszą kolejno: 22,4MPa dla stali C45, 21,9 dla stopu aluminium Ak9 oraz 21,7 MPa dla stopu magnezu AZ91. Najmniejsze naprężenia występują na obręczy koła, oraz w środkowej części felgi, zwłaszcza w okolicach miejsca mocowania. Wynoszą one 0,13 dla C45; 0,145 dla Ak9 oraz 0,143 dla AZ91 (rys. 5–7). Różnice pomiędzy naprężeniami dla wybranych materiałów są niewielkie, wynoszą dziesiąte części MPa. Jednocześnie w każdym przypadku naprężenia są wielokrotnie mniejsze niż granica plastyczności materiałów.

Tabela 6 Porównanie naprężenia zredukowanego Von Misesa dla modelu felgi obciążonego 6kN

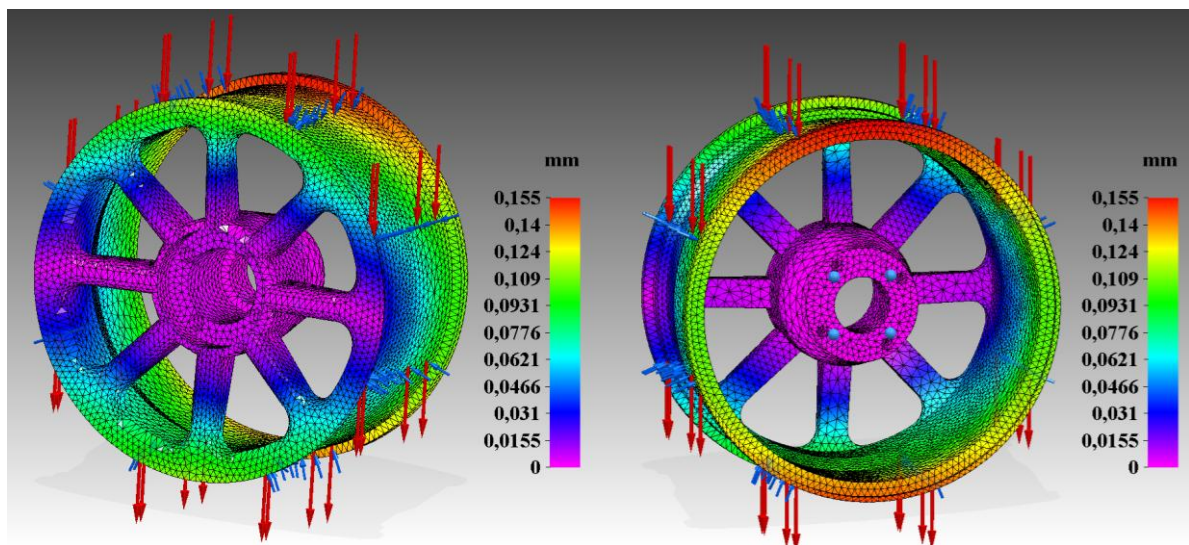
Table 6 Comparison of reduced Von Mises stress for a 6kN loaded rim model

Obciążenie [kN]	Ciśnienie [Bar]	Materiał	Minimalne naprężenie zredukowane Von Misesa [MPa]	Maksymalne naprężenie zredukowane Von Misesa [MPa]
6	2,5	C45	0,13	22,4
		Ak9	0,145	21,9
		AZ91	0,143	21,7



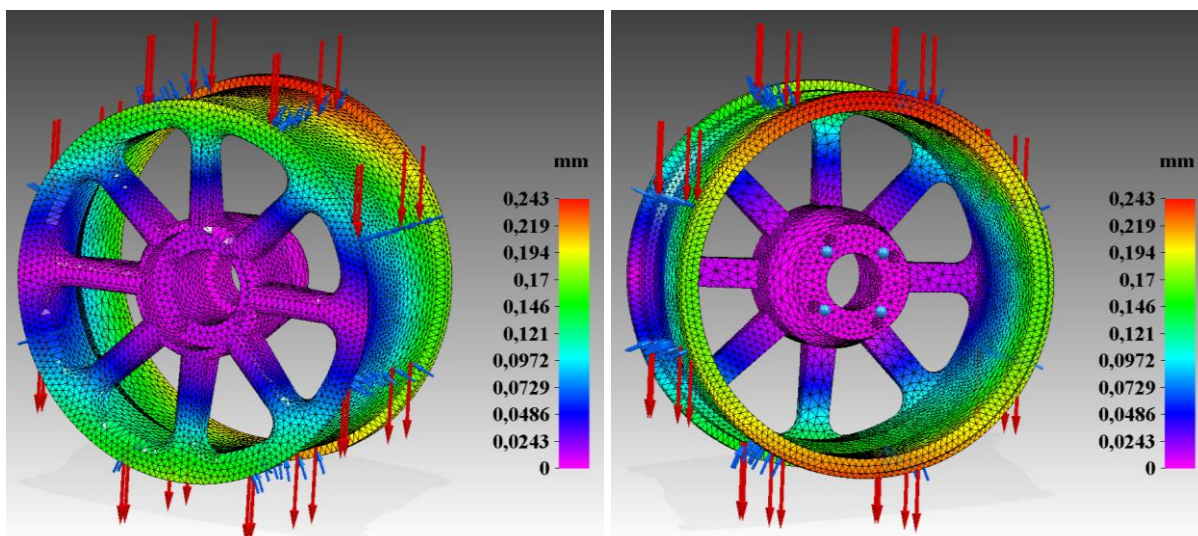
Rys. 8 Przemieszczenie całkowite przy zastosowaniu stali C45 dla obciążenia 6kN

Fig. 8 Total displacement using C45 steel for 6kN load



Rys. 9 Przemieszczenie całkowite przy zastosowaniu stopu Aluminium Ak9 dla obciążenia 6kN

Fig. 9 Total displacement using Ak9 aluminum alloy for 6kN load



Rys. 10 Przesunięcie całkowite przy zastosowaniu stopu Magnezu Az91 dla obciążenia 6kN

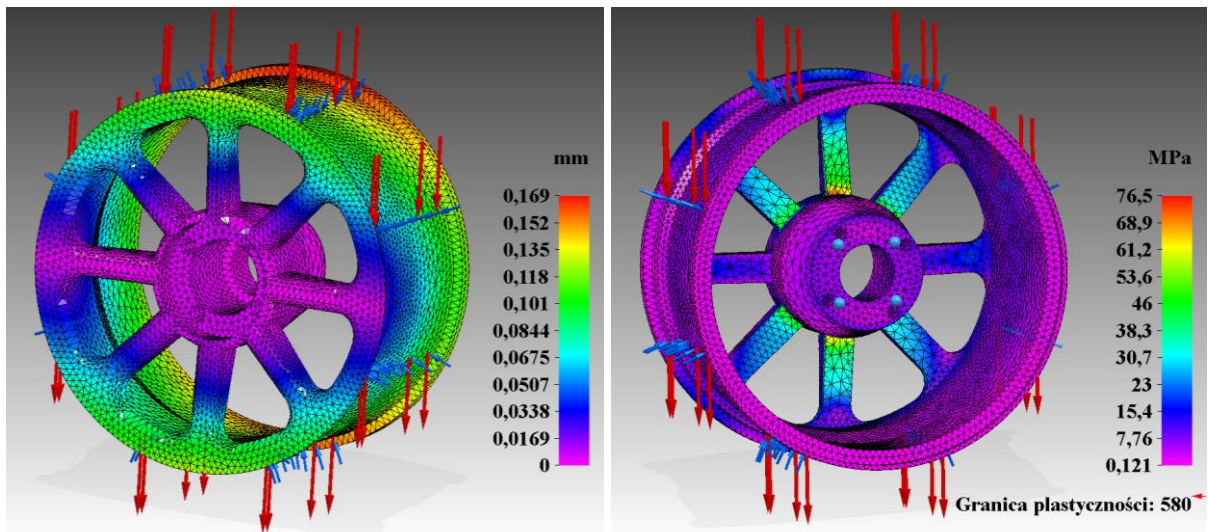
Fig. 10 Total displacement using Magnesium Az91 alloy for 6kN load

Dla badanego obciążenia 6kN przesunięcie całkowite w zależności od materiału wynosi (kolejno): 0,243mm dla stopu magnezu; 0,155mm dla stopu aluminium, a najmniejsze jest dla stali i wynosi 0,051mm (tab. 7). W żadnym z rozpatrywanych przypadków zdefiniowane obciążenie nie powoduje nadmiernych obciążeń w badanym modelu. Jednak można zaobserwować największe przesunięcie na wewnętrznej części obręczy koła. Natomiast najmniejsze przesunięcie występuje na środkowej części modelu felgi.

Tabela 7 Porównanie przesunięcia całkowitego dla modelu felgi obciążonego 6kN
Table 7: Comparison of total displacement for a 6kN loaded rim model

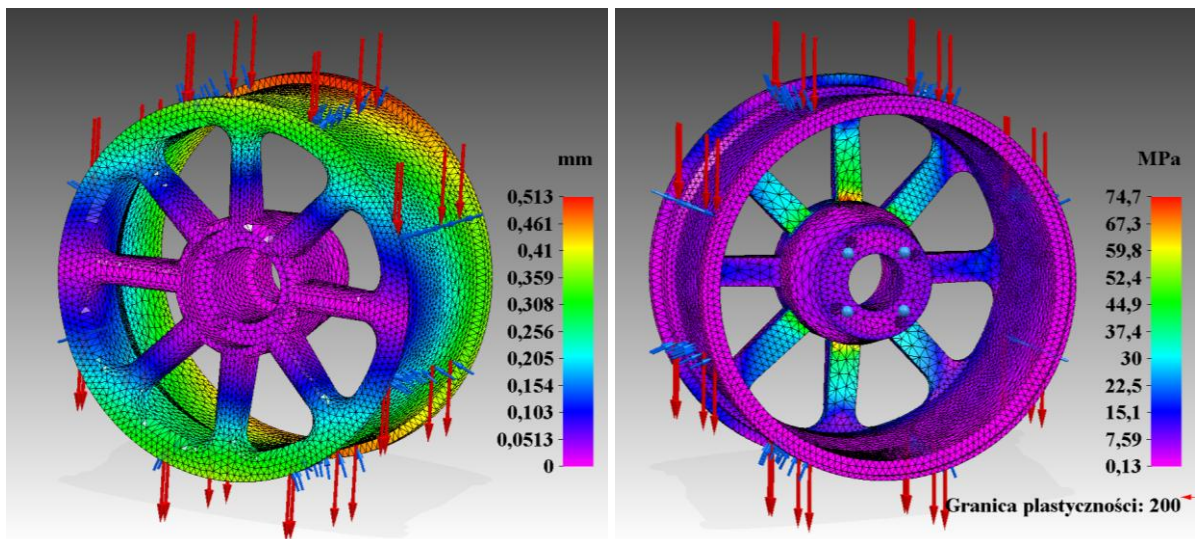
Obciążenie [kN]	Ciśnienie [Bar]	Materiał	Maksymalne przesunięcie całkowite [mm]
6	2,5	C45	0,051
		Ak9	0,155
		Az91	0,243

W drugim aspekcie symulacji skupiono się na uwydatnieniu różnic w materiałach poprzez zadanie znacznie większego obciążenia z wartości 6kN do 20kN.



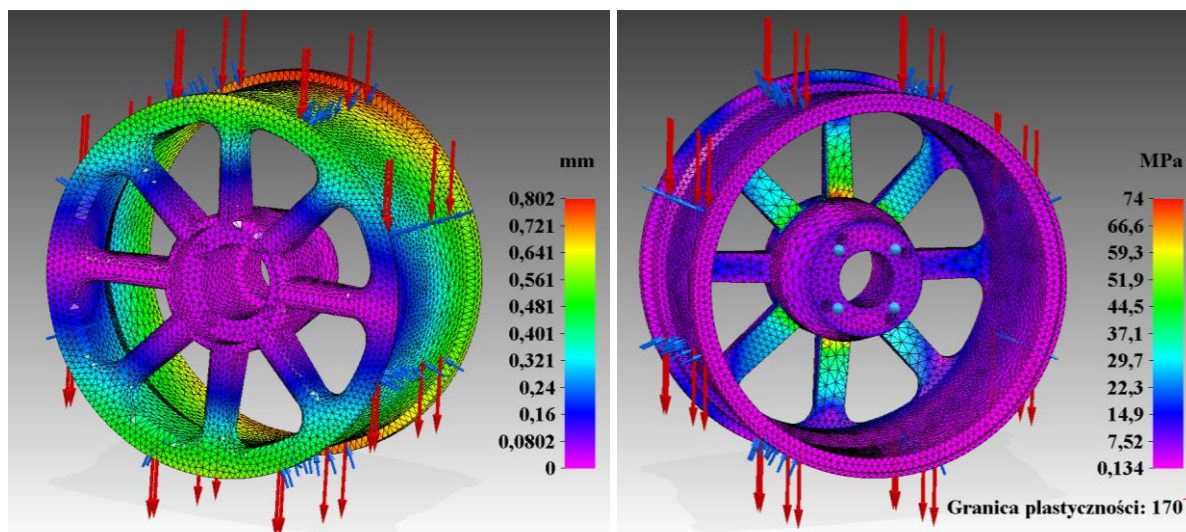
Rys. 11 Obciążenie porównawcze 20kN przy zastosowaniu Stali C45 a) przemieszczenie całkowite b) naprężenia zredukowane Von Misesa

Fig. 11 Comparative load 20kN using C45 steel a) Total displacement b) Von Mises reduced stress



Rys. 12 Obciążenie porównawcze 20kN przy zastosowaniu stopu Aluminium Ak9 a) przemieszczenie całkowite b) naprężenia zredukowane Von Misesa

Fig. 12 Comparative load 20kN using Ak9 aluminum alloy a) Total displacement b) Von Mises reduced stress



Rys. 13 Obciążenie porównawcze 20kN przy zastosowaniu stopu Magnezu Az91 a) przemieszczenie całkowite b) naprężenia zredukowane Von Misesa

Fig. 13 Comparative load of 20kN using Magnesium Az91 alloy a) Total displacement b) Von Mises's reduced stress

W przypadku obciążenia 20kN tego samego modelu felgi, maksymalne naprężenia wzrosły z wartości 21,7 do 22,4 dla obciążenia 6kN oraz od wartości 74 do 76,5 MPa dla obciążenia 20 kN. Najwyższą wartość można zaobserwować dla modelu felgi wykonanej ze stali C45, a najmniejszą ze stopu magnezu AZ91 oraz stopu aluminium Ak9 – 74,7 MPa. Obszary występowania największych naprężeń są porównywalne z naprężeniami powstałymi przy obciążeniu modelu felgi 6kN. Pomimo zwiększenia obciążenia do wartości 20kN, każdy z trzech wybranych materiałów spełnia wymagania wytrzymałościowe stawiane felgą samochodowym.

W przypadku badania przesunięcia, przy obciążeniu 20kN największa wartość zbliżyła się do milimetra, wynosząc 0,8 mm dla stopu magnezu AZ91. Pośrednią wartość przesunięcia 0,513mm otrzymano przy wykorzystaniu stopu aluminium Ak9 a najmniejszą, 0,169mm dla stali C45. Występowanie przesunięcia maksymalnego pokrywa się z symulacją dla obciążenia 6kN.

Tabela 8 Porównanie naprężenia zredukowanego Von Misesa oraz przesunięcia całkowitego dla modelu felgi obciążonego 20kN

Table 8 Comparison of Von Mises's reduced stress and total displacement for a 20kN loaded rim model

Obciążenie [kN]	Ciśnienie [Bar]	Materiał	Minimalne naprężenie Von Misesa [MPa]	Maksymalne naprężenie Von Misesa [MPa]	Maksymalne przesunięcie całkowite [mm]
20kN	2,5	C45	0,121	76,5	0,169
		Ak9	0,13	74,7	0,513
		AZ91	0,134	74	0,802

Wyniki badania współczynników bezpieczeństwa, symulacji modelu felgi dla zadanych obciążeń o wartości 6 kN oraz 20 kN przedstawione są w tabeli 9. W przypadku obciążenia zgodnego z założoną masą pojazdu 6kN najmniejszy współczynnik bezpieczeństwa posiada model wykonany ze stopu magnezu AZ91, lecz jest on i tak ponad dwukrotnie większy od wymaganego i wynosi 7,82. Dla pozostałych metali wartości współczynnika wynoszą 9,15 dla stopu aluminium Ak9 oraz najwięcej 25,9 dla stali C45. Przy zastosowaniu obciążenia 20kN współczynnik dla stopów magnezu i aluminium jest mniejszy od 3. Mając na względzie, że docelowe obciążenie, równe 9kN jest znacznie mniejsze, otrzymane wartości są wystarczające. Stal nawet przy zwiększonym obciążeniu wykazuje współczynnik bezpieczeństwa równy 7,58.

Tabela 9 Współczynnika bezpieczeństwa dla modelu felgi obciążonego 6kN oraz 20 kN
Table 9 Safety factor for the 6kN and 20 kN loaded rim model

Nalożone obciążenie [kN]	Ciśnienie [Bar]	Materiał	Współczynnik bezpieczeństwa min
6	2,5	C45	25,9
		Ak9	9,15
		AZ91	7,82
20	2,5	C45	7,58
		Ak9	2,68
		AZ91	2,3

Jednym z najistotniejszych parametrów modelu felgi samochodowej jest waga, która jest zależna od geometrii modelu oraz jego rozmiaru, ale przede wszystkim od zastosowanego materiału. Zastosowane różnego materiały do analizowanego modelu felgi przyczyniło się także do zróżnicowania ich wagami. Najniższą wagą charakteryzuje się felga wykonana ze stopu magnezu AZ91, która wynosi 8,717 kg, natomiast najwyższą stal C45 wynosząca 37,563kg. Felga ze stopu aluminium Ak9 jest 25kg lżejsza w stosunku do wagi felgi ze stali C45 oraz 4 kg cięższa od felgi wykonanej ze stopu magnezu AZ91. Różnica pomiędzy felgą najcięższą, a najlżejszą jest czterokrotna i wynosi ponad 28kg.

Tabela 10 Porównanie masy modelu w zależności od zastosowanego materiału
Table 10 Comparison of model weight depending on the material used

Zastosowany materiał	Masa modelu [Kg]
C45	37,563
Ak9	12,762
AZ91	8,717

4. PODSUMOWANIE

Dobór materiału do produkcji felgi samochodu osobowego nie jest łatwym zadaniem, z racji wielu czynników materiałowych, na które trzeba zwrócić uwagę podczas projektowania. Jest to jednak bardzo istotne, ponieważ w samochodzie każdy, nawet najmniejszy szczegół może mieć istotne znaczenie dla osiągnięć jak i bezpieczeństwa kierowcy i pasażerów. Po wykonanych badaniach za pomocą symulacji metodą MES można określić, że każdy z użytych materiałów spełnił stawiane mu wymagania wytrzymałościowe. Analiza i porównanie otrzymanych wyników pozwoliło określić, który z materiałów będzie najbardziej odpowiedni do opisywanej w niniejszej pracy geometrii felgi samochodowej. Analiza przedmiotu ukazała, że w żadnym z analizowanych przypadkach, niezależnie czy obciążono felgę (6kN czy 20kN) nie została przekroczona granica plastyczności. Wartości naprężeń miały podobną wartość oscylującą w granicach 22 MPa dla obciążenia 6 kN oraz 75 MPa dla 20 kN. W obydwu przypadkach największe naprężenia zarejestrowano dla stali. Badanie przesunięcia całkowitego pozwoliło zaobserwować większe różnice niż w przypadku naprężenia. Jednak największe przesunięcie całkowite, przy 20 kN nie przekroczyło 0,8 mm dla stopu magnezu AZ91. Dla aluminium przesunięcie wyniosło maksymalnie 0,5 mm i 1,7 mm dla stali. Przy zakładanym obciążeniu 6 kN wartości przesunięcia były jeszcze mniejsze i nie przekroczyły 0,25 mm dla stopu magnezu, 0,155 mm dla stopu aluminium oraz 0,05 mm dla stali. Pomimo małych wartości można zaobserwować, że najmniej podatna na odkształcenie jest stal C45, a najbardziej stop magnezu AZ91. Otrzymane wyniki symulacji pozwoliły zaobserwować, że największe przesunięcia występuje na wewnętrznej stronie obręczy. Naprężenia natomiast są największe na połączeniu ramion ze środkową częścią felgi i znacznie mniejsze na zewnątrz obręczy. Biorąc pod uwagę znaczną różnicę wagi modelu felgi w zależności od zastosowanych materiałów, wynoszącą ponad 28kg można określić że w najmniejszym stopniu do produkcji tego modelu felgi nadaje się stal C45. Model felgi w którym zastosowano stop magnezu AZ91 charakteryzuje się najniższą wagą, jednocześnie występuje w nim największe przesunięcie całkowite. Zastosowanie stopu aluminium Ak9 do modelu felgi umożliwiło otrzymanie felgi o wadze znacznie mniejszej niż w przypadku modelu ze stali, jednocześnie zachowując małe przesunięcie całkowite. Podkreślając warto zwrócić uwagę, że wybór najlepszego materiału jest zależny od docelowego przeznaczenia felgi samochodowej.

LITERATURA

1. L. A. Dobrzańskiego, Leksykon materiałoznawstwa, Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej, Warszawa 1999.
2. W. Linnik, Metoda najmniejszych kwadratów i teoria opracowywania informacji, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1962.
3. A. Gługosz, Optymalizacja wielokryterialna w zagadnieniach pól sprzężonych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
4. J. Sobczak, Z. Górny, Odlewnicze stopy metali nieżelaznych, Ministerstwo Edukacji i Nauki, Kraków 2005.
5. <http://felgido.pl/article/technologie-produkcji-felg-aluminiowych>, [dostęp z dnia 29.04.2017].

6. Polski Komitet Normalizacyjny: PN-76/H-88027 (pol). Katalog Polskich norm. [dostęp z dnia 1.06.20017].
7. K. Banaś, Wprowadzenie do MES, Uniwersytet Jagielloński 2012.
8. Polski Komitet Normalizacyjny: Norma PN-EN 1753:2001(pol). Katalog Polskich norm. [dostęp z dnia 1.06.20017].
9. Polski Komitet Normalizacyjny: PN-EN 10083-2 (pol). Katalog Polskich norm. [dostęp z dnia 1.06.20017].