

## Ocena wytrzymałości konstrukcji trójkąta hamulcowego wagonu towarowego

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń i badań wytrzymałości konstrukcji trójkąta hamulcowego dla wagonu towarowego o obciążeniu nominalnym 120kN, mających na celu optymalizację geometrii ze względu na zwiększenie przestrzeni montażowej. Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych w oparciu o wymagania zawarte w Polskiej Normie [1]. Wyniki obliczeń przyjętych wariantów konstrukcyjnych porównano z rezultatami badań stanowiskowych trójkątów i stwierdzono, że wyniki te pokrywają się.

### 1. WSTĘP

Przedmiotem artykułu jest trójkąt hamulcowy o obciążeniu nominalnym  $F=120\text{kN}$  [1], stosowany w ruchu towarowym o reżimie „SS”. Pierwotne rozwiązanie konstrukcyjne, przy małej masie własnej, spełnia wszystkie kryteria wytrzymałościowe i technologiczne zawarte w PN [1]. Kolejny etap projektowania trójkątów hamulcowych obejmował ocenę konstrukcji pod względem wymagań montażowych oraz funkcjonalnych. Omawiana konstrukcja została zaprojektowana oraz przebadana w IPS „TABOR” w Poznaniu. Celem podjętych prac było porównanie wyników badań z wynikami obliczeń konstrukcji trójkąta, a następnie zamodelowanie takiego przekroju poprzecznego rury w rejonie środkowym, który zapewni zmniejszenie wymiaru gabarytowego w płaszczyźnie wzdłużnej i nie wpłynie negatywnie na wartości rozkładu naprężeń i odkształceń konstrukcji.

Trójkąt jest konstrukcją spawaną wykonaną ze stali 18G2A o grubości elementów do 80mm. Główne elementy to: czop wykonany w postaci odkuwki, ramię wykonane w postaci giętego płaskownika, w miejscu gięcia element ten połączony jest obwodową spoiną pachwinową z uchem trójkąta.

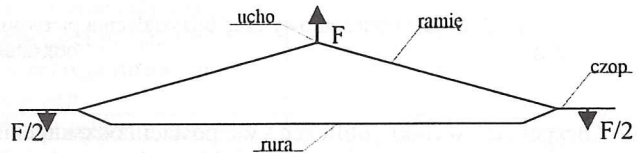
Podstawowe wielkości trójkąta hamulcowego:

- szerokość trójkąta: 1590 mm,
- odległość pomiędzy osią czopa a osią symetrii otworu ucha: 330mm,
- średnica czopa:  $\phi 60a11$ ,
- masa trójkąta hamulcowego (nominalna): 44,1kg.

Obciążenia trójkąta przyjęto na podstawie wymagań zawartych w PN-91/K-88176 [1]. Obliczenia wytrzymałościowe konstrukcji przeprowadzono z wykorzystaniem programu opartego na metodzie elementów skończonych (MES).

### 2. OBCIĄŻENIA I KRYTERIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

W obliczeniach trójkąta hamulcowego uwzględniono dwa przypadki obciążenia siłami rozciągającymi o wartościach: 120kN obciążenie nominalne oraz 180kN obciążenie próbne. Schemat obciążenia przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat obciążenia trójkąta hamulcowego

Rozpatrywaną konstrukcję wykonano ze stali 18G2A/E355 [2], której własności wytrzymałościowe zamieszczono w tabeli 1.

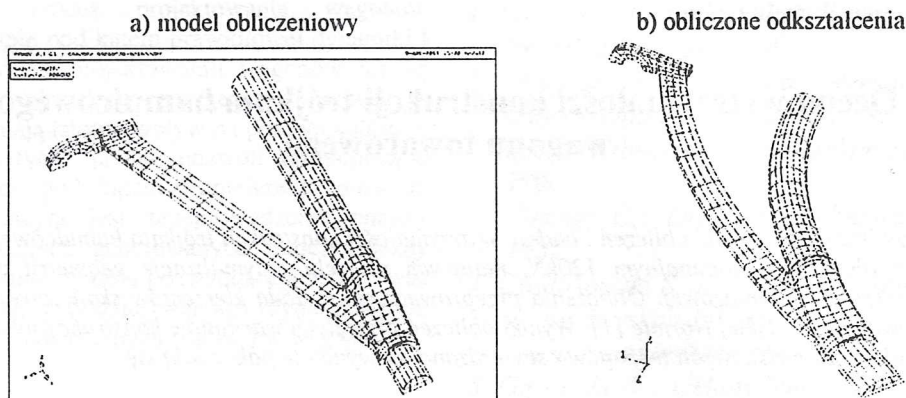
Tabela 1. Własności wytrzymałościowe stali 18G2A/E355

Grubość elementu [mm]	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
3÷16	355	490÷630
17÷30	345	
30÷50	335	
50÷70	320	

Główne kryterium wytrzymałościowe dla powyższych obciążeń stanowi maksymalne dopuszczalne odkształcenie sprężyste oraz trwałe [1]. Dla rozciągania siłą nominalną (120kN) dopuszczalne odkształcenie sprężyste wynosi 2mm, natomiast dla rozciągania siłą próbną (180kN) odkształcenie sprężyste nie może przekroczyć 3mm. Dopuszczalne odkształcenie trwałe, jakie może wystąpić po zdjęciu obciążenia nominalnego to 0,1mm, natomiast przy obciążeniu próbnym odkształcenie trwałe nie może przekroczyć 0,5mm. Po odciążeniu trójkąt hamulcowy nie powinien posiadać żadnych pęknięć, naderwań i innych uszkodzeń.

### 3. OBLICZENIA PIERWOTNEJ KONSTRUKCJI

Model obliczeniowy pierwotnej konstrukcji (rys. 2), w oparciu o który przeprowadzono obliczenia, obejmuje 1/4 część trójkąta hamulcowego. Do zamodelowania geometrii zastosowano sześciocienne elementy bryłowe. Połączenie ucha z ramieniem trójkąta oraz rury z czopami zrealizowano w sposób zapewniający wierne odwzorowanie połączeń na rzeczywistym obiekcie. Podział modelu na elementy skończone przedstawia rys. 2. Kształt i wymiary geometryczne trójkąta przyjęto na podstawie dokumentacji technicznej [3]. W celu odzwierciedlenia prawidłowej pracy, zamocowania i geometrycznej symetrii trójkąta wprowadzono odpowiednie warunki brzegowe.



Rys. 2. Model obliczeniowy oraz odkształcenia pierwotnej konstrukcji trójkąta, przy obciążeniu siłą rozciągającą 180kN (skala odkształcenia 150:1)

Otrzymane wyniki obliczeń w postaci odkształceń konstrukcji przedstawiono na rysunku 2. Natomiast w tabeli 2 zestawiono wartości naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa w najbardziej interesujących miejscach konstrukcji.

Maksymalna wartość odkształcenia konstrukcji  $\delta$  występuje na poziomej płaszczyźnie symetrii wewnątrz otworu ucha trójkąta i wynosi:

- $\delta = 2,02\text{mm}$  ~ rozciąganie siłą 120kN,
- $\delta = 3,04\text{mm}$  ~ rozciąganie siłą 180kN,

W rzeczywistości na stanowisku badawczym zmierzone odkształcenia konstrukcji są mniejsze, ponieważ początkowe obciążenie 10kN traktowane jest jako obciążenie wstępne [1], od którego należy rozpocząć pomiar odkształceń<sup>1)</sup>. W związku z tak przyjętą metodyką badań wartości odkształceń należy odpowiednio skorygować i wówczas przyjmą następujące wartości:

- $\delta^* = 1,85\text{mm}$  ~ rozciąganie siłą 120kN,
- $\delta^* = 2,87\text{mm}$  ~ rozciąganie siłą 180kN,

Tabela 2. Rozkład naprężeń zredukowanych w [MPa] wg hipotezy Hubera-Misesa w najbardziej interesujących miejscach pierwotnej konstrukcji

Miejsce występowania maksymalnych naprężeń zredukowanych $\sigma_{red}$	Obciążenie 120kN	Obciążenie 180kN
	Naprężenia $\sigma_{red}$ [MPa]	Naprężenia $\sigma_{red}$ [MPa]
W rejonie zakończenia spoiny na połączeniu ucha z ramieniem trójkąta	310	465
Na spoinie łączącej ucho z ramieniem	235	353
Po stronie ściskanej na połączeniu łącznika o przekroju rurowym z czopem	178	268
Na połączeniu ramienia z czopem	154	231

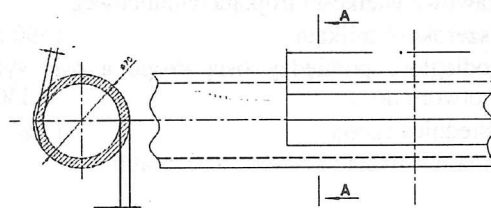
<sup>1)</sup> celem wykasowania luzów w oprzyrządowaniu pomiarowym

#### 4. OBLICZENIA ZMODYFIKOWANEJ WERSJI TRÓJKĄTA

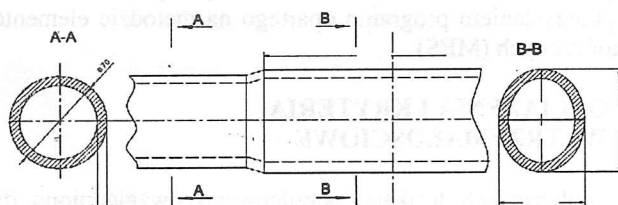
W trakcie prowadzonych prac nad trójkątem zaistniała potrzeba jego modyfikacji. Wprowadzona zmiana miała zagwarantować powiększenie przestrzeni montażowej na wózku towarowym przez zmniejszenie wymiaru wzdłużnego w środkowym rejonie rury. Jednocześnie oczekiwano, że poziom odkształceń i wyężenia konstrukcji pozostanie na niezmiennym poziomie.

Zaproponowano rozważenie wpływu następujących trzech czynników:

- 1) zmianę wielkości odsadzenia czopa (odkuwki) trójkąta,
- 2) skrócenie poprzecznego wymiaru rury przez wprowadzenie ścięć ścianki x (rys. 3.),
- 3) zmianę w części środkowej rury przekroju poprzecznego okrągłego na przekrój eliptyczny (rys. 4.).



Rys. 3. Szkic przedstawiający podcięcie rury w środkowej części trójkąta.



Rys. 4. Szkic przedstawiający eliptyczny przekrój rury w środkowej części trójkąta.

Dla wariantu, w którym zmniejszono odsadzenie czopa (odkuwki) odnotowano następujące maksymalne odkształcenia konstrukcji:

- $\delta = 2,06\text{mm}$  (dla 120kN)  $\Rightarrow \delta^* = 1,89\text{mm}$ ,
- $\delta = 3,09\text{mm}$  (dla 180kN)  $\Rightarrow \delta^* = 2,92\text{mm}$ .

Poziom i rozkład naprężeń w rozpatrywanym rozwiązaniu znacząco nie odbiegał od rozwiązania początkowego.

Dla wariantu gdzie zamodelowano lokalne zmniejszenie grubości ścianki rury (rys. 3.) maksymalne odkształcenia konstrukcji wyniosły:

- $\delta = 2,12\text{mm}$  (dla 120kN)  $\Rightarrow \delta^* = 1,94\text{mm}$ ,
- $\delta = 3,18\text{mm}$  (dla 180kN)  $\Rightarrow \delta^* = 3,00\text{mm}$ .

Choć maksymalne odkształcenia konstrukcji dla tego wariantu nie przekroczyły wartości granicznych [1] to jednak należy spodziewać się, że na stanowisku badawczym przy obciążeniu siłą 180kN nastąpi przekroczenie dopuszczalnych odkształceń trwałych, ponieważ nastąpiło 30%-we przekroczenie granicy plastyczności w rejonie podcięcia rury.

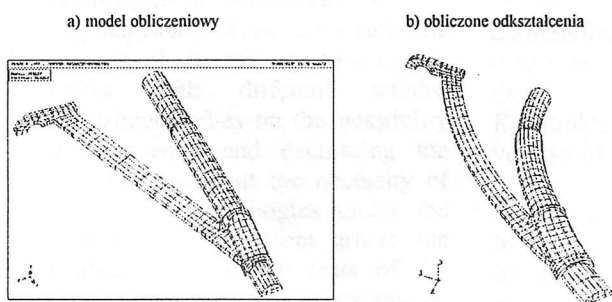
Ostatnim etapem modyfikacji konstrukcji trójkąta była częściowa zmiana przekroju okrągłego rury na przekrój eliptyczny w części środkowej. To rozwiązanie okazało się najbardziej korzystnym pod względem odkształceń i występującego rozkładu naprężeń. Z tego powodu zaproponowano to rozwiązanie jako ostateczne i zamykające temat obliczeń trójkąta przeznaczonego do ruchu towarowego w reżimie „SS”.

Model obliczeniowy ostatecznej wersji trójkąta, w oparciu o który przeprowadzono obliczenia, zaadaptowano z pierwotnego modelu. Podział modelu na elementy skończone przedstawia rysunek 5. Obciążenia przyłożono zgodnie z PN-91/K-88176 [1], schemat obciążeń przedstawiono na rys. 1.

Otrzymane wyniki obliczeń dla zadeklarowanych wartości a i b w postaci odkształceń konstrukcji przedstawiono na rysunku 5. Natomiast w tabeli 3 zestawiono wartości naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera – Misesa w najbardziej interesujących miejscach konstrukcji.

Największe wartości odkształceń odnotowano również na poziomej płaszczyźnie symetrii wewnątrz otworu ucha trójkąta i wyniosły:

- $\delta = 2,03\text{mm}$  (dla 120kN)  $\Rightarrow \delta^* = 1,86\text{mm}$ ,
- $\delta = 3,05\text{mm}$  (dla 180kN)  $\Rightarrow \delta^* = 2,88\text{mm}$ .



Rys. 5. Model obliczeniowy oraz odkształcenia konstrukcji zmodyfikowanego trójkąta, przy obciążeniu siłą rozciągającą 180kN (skala odkształcenia 150:1)

Tabela 3.

Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] wg hipotezy Hubera ~ Misesa w najbardziej interesujących miejscach zmodernizowanej konstrukcji

Miejsce występowania maksymalnych naprężeń zredukowanych	Obciążenie 120kN	Obciążenie 180kN
	Naprężenia $\sigma_{red}$ [MPa]	Naprężenia $\sigma_{red}$ [MPa]
W rejonie zakończenia spoiny na połączeniu ucha z ramieniem trójkąta	310	464
Na spoinie łączącej ucho z ramieniem	234	351
Po stronie ściskanej na połączeniu łącznika o przekroju rurowym z czopem	173	260
Na połączeniu ramienia z czopem	154	231

## 5. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ Z WYNIKAMI BADAŃ

Przedstawione zestawienie wyników obliczeń i badań obejmuje pierwotną oraz ostatnią (przekrój eliptyczny w części środkowej rury) wersję trójkąta hamulcowego. Dokonano jedynie porównania odkształceń konstrukcji (tab. 4.), nie zestawiono naprężeń otrzymanych na drodze obliczeń i badań, gdyż przy ocenie wytrzymałości tego typu konstrukcji główne kryterium stanowią graniczne odkształcenia sprężyste oraz trwałe [1].

Tabela 4.

Zestawienie maksymalnych odkształceń konstrukcji trójkąta hamulcowego uzyskanych na drodze badań [4, 5] i obliczeń wytrzymałościowych

Maksymalne odkształcenia konstrukcji $\delta^*$ [mm]	OBCIĄŻENIE 120kN		OBCIĄŻENIE 180kN	
	BADA-NIA	OBLI-CZENIA	BADA-NIA	OBLI-CZENIA
Pierwotna wersja konstrukcji	1,91	1,85	2,92	2,87
Ostateczna wersja konstrukcji	1,86	1,86	2,81	2,88

Porównując wartości odkształceń konstrukcji (tab. 4), które zmierzono na obiekcie rzeczywistym (stanowisko badawcze) oraz modelu dyskretnym (obliczenia metodą MES) można stwierdzić, że występuje pełna zbieżność pomiędzy wynikami obliczeń i badań. Maksymalna różnica odkształceń obliczonych i zmierzonych nie przekracza 5% dla realizowanych obciążeń.

## 6. PODSUMOWANIE

Analizując otrzymane wyniki obliczeń i badań można stwierdzić, że założony na początku cel pracy został w pełni osiągnięty. Wyniki obliczeń wersji pierwotnej jak i zmodernizowanej pokrywają się z wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym. Dzięki modernizacji uzyskano mniejszy wymiar gabarytowy, o 1%, w płaszczynie wzdłużnej przy zachowaniu tej samej masy trójkąta.

Na podstawie otrzymanych rezultatów można stwierdzić, iż przyjęte założenia i uproszczenia konstrukcji konieczne do dyskretyzacji modelu trójkąta zostały przyjęte w sposób prawidłowy.

## 7. LITERATURA

1. PN - 91/K - 88176: *Wagony towarowe. Trójkąty hamulcowe.*
2. PN - 86/H - 84018: *Stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości. Gatunki.*
3. 3TNg 081117-1-00 *Dokumentacja techniczna. IPS „TABOR”.*
4. RP - 0066: *Badania Statyczne i zmęczeniowe trójkątów hamulcowych typu 120 do ruchu „SS” wg 3TNg 081117-1-00 IPS „TABOR”.*