

Marek Sitarz, Adam Mańka, Ilona Mańka, Wojciech Gamon

Weryfikacja wytrzymałościowa głowicy sprzęgu tramwajowego

Aktualny trend do zwiększania prędkości przejazdu oraz liczby przewożonych osób i towarów przy jednoczesnej redukcji kosztów dotyczy chyba wszystkich rodzajów transportu, w tym transportu tramwajowego. Zwiększając jednak masę całkowitą pojazdu lub prędkość przejazdu, należy wziąć pod uwagę również względy bezpieczeństwa. W transporcie tramwajowym w Polsce zauważyć można jednak wieloletni brak aktualizacji wymagań normatywnych, dotyczących aspektów bezpieczeństwa, które – w połączeniu z nowymi rozwiązaniami technicznymi – zaczynają być nieadekwatne do zaistniałej sytuacji. Dobrym przykładem jest poruszany w ramach artykułu temat sprzęgu tramwajowego (tzw. sprzęg Alberta) – rys. 1.

Sprzęg ten opracowany został w 1920 roku przez niemieckiego konstruktora Karla Alberta w firmie Krefelder Verkehrs-AG (obecnie KREVAG) i stosowany jest do dzisiaj pomimo znacznego zwiększania mas i prędkości ciągniętych wagonów tramwajowych. Sprzęg Alberta jest konstrukcją, która sprawdziła się w wieloletniej eksploatacji, jednak aktualnie planuje się wykorzystanie tego sposobu połączenia dla tramwajów o znacznie większej masie. Dlatego też istnieje potrzeba weryfikacji wytrzymałościowej tego elementu, zarówno z uwagi na bezpieczeństwo w transporcie, jak i dla weryfikacji wymagań oraz aktualizacji normy *Tabor tramwajowy. Urządzenie sprzęgające tramwajowego międzywagonowego sprzęgu* (PN-91/K-88250-4).

Weryfikację wytrzymałościową sprzęgu tramwajowego przeprowadzono z uwagi na kryterium ciągniętej i hamowanej masy wagonu z uwzględnieniem maksymalnych przeciążeń hamowania i przyspieszania, które podają producenci najczęściej eksploatowanych w Polsce tramwajów. Weryfikację tę przeprowadzono z wykorzystaniem modułu do obliczeń numerycznych w oparciu o metodę elementów skończonych (MES) systemu CATIA v5. Model przestrzenny kompletnego złożonego sprzęgu

tramwajowego – tj. 2 głowice, 2 kliny oraz 6 nitów oraz 2 drągi sprzęgu („dyszle”) – obciążono siłą ściskającą i rozciągającą, przyłożoną do drągu po jednej stronie, a utwierdzoną w przekroju drągu po stronie przeciwległej. Uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych MES maksymalne wartości siły, przy których konstrukcja jest w stanie przenieść obciążenia z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa, jest podstawą do wyznaczenia masy wagonu ciągniętego. Dla analiz wytrzymałościowych założono poprawny montaż i utrzymanie sprzęgu tramwajowego oraz własności materiałowych przy zapewnieniu należytych reżimów użytkowania, w tym prowadzenia pojazdu.

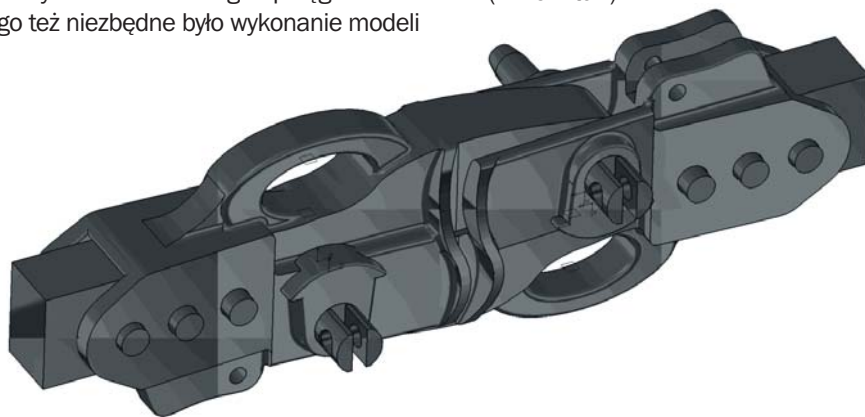
Budowa modeli CAD

Celem realizowanych prac było uzyskanie informacji dotyczącej maksymalnej masy tramwaju, jaka może być ciągnięta z wykorzystaniem badanego sprzęgu. Dlatego też niezbędne było wykonanie modeli

CAD 3D poszczególnych elementów sprzęgu tramwajowego, tzw. sprzęgu Alberta (praca ta została wykonana przez Studenckie Koło Naukowe C.A.D działające przy Katedrze Transportu Szynowego [3]). W kolejnym etapie dokonano jego złożenia w systemie CATIA V5, nadano więzy geometryczne oraz więzy MES, a następnie – po nałożeniu obciążeń i warunków brzegowych – przeprowadzono analizę MES oraz analizę uzyskanych wyników dla różnych konfiguracji spotykanych w eksploatacji.

Nałożenie obciążeń, warunków brzegowych i początkowych oraz analizę MES przeprowadzono dla następujących konfiguracji:

- sprzęg z dwoma sworzniami i kompletem nitów (połączenie poprawne);
- sprzęg z jednym sworzniem i kompletem nitów;
- sprzęg z dwoma sworzniami i dwoma z trzech nitów przypadających na stronę (4 z 6 nitów).



Rys. 1. Widok przestrzenny i zdjęcie sprzęgu tramwajowego (sprzęgu Alberta)

W trakcie budowy modelu przestrzennego poszczególnych części, a następnie złożenia analizowanego sprzęgu tramwajowego (sprzęgu Alberta), bazowano na wytycznych normy *Tabor tramwajowy. Urządzenie sprzęgające tramwajowego międzywagonowego sprzęgu* (PN-91/K-88250-4) z wprowadzoną korektą.

W ramach pracy wykonano rysunki techniczne wykonawcze i złożeniowe utworzonych w programie CATIA v5 modeli przestrzennych poszczególnych elementów, tj. głowicy, pałaka, klina, śruby, podkładki, nakrętki oraz fragmentu drąga sprzęgu – fot. 3.

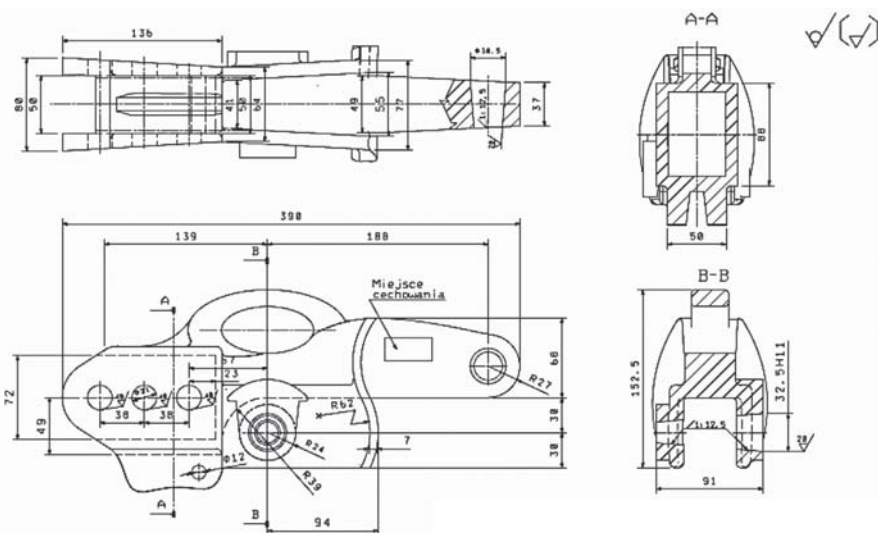
Budowa modeli MES

W przeprowadzonej analizie numerycznej wzięto pod uwagę następujące własności modelu numerycznego:

- * nieliniowa geometria modelu,
- * elementy skończone o nieliniowej funkcji kształtu,
- * obciążenia mechaniczne założone na podstawie uzyskanych maksymalnych dopuszczalnych przeciążeń przyspieszenia i hamowania służbowego, tj. odpowiednio $1,4 [m/s^2]$ i $1,8 [m/s^2]$,
- * badany sprzęg zweryfikowany pod względem wymagań wytrzymałościowych normy PN-91/K-88250 wg punktu 5.3.4, tj. dla wartości 100 [kN] i 300 [kN],
- * materiał głowicy przyjęty zgodnie z normą PN-91/K-88250, tj. staliwo L450, dla którego założono wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 450 [MPa]$,
- * założone poprawne wykonanie zastosowanych połączeń nitowanych z zapewnieniem naprężeń ściskających i wypełnienie otworów przez spęczanie i poprawny dobór tolerancji i pasowania,
- * wzięcie pod uwagę podczas analizy MES kilku konfiguracji obciążeń badanych elementów.

Do modelu MES wykorzystano również uproszczony model drąga sprzęgu, który połączono z głowicą trzema sworzniami (nitami). Element ten dodano w celu możliwie wiernego odzwierciedlenia warunków pracy sprzęgu, w którym odzwierciedlono 2 głowice, 2 kliny oraz 6 nitów.

W ramach prowadzonej analizy sprawdzono różne konfiguracje obciążeń badanego sprzęgu dla różnych wartości siły rozciągającej i ściskającej, tj.:



Rys. 2. Rysunek wykonawczy badanego sprzęgu tramwajowego (sprzęgu Alberta), opracowany na bazie normy [4] oraz modelu wykonanego w systemie CATIA v5 [3]



Rys. 3. Widok modelu 3D sprzęgu tramwajowego w systemie CATIA V5

- | | |
|--|---|
| <p>A. sprzęg kompletny i złożony poprawnie (6 nitów, 2 kliny):</p> <p>A.1. siła rozciągająca wynikająca z przyspieszenia $1,8 [m/s^2]$ (założono jako obciążenia eksploatacyjne bez wpływu zjawisk zmęczeniowych dla najwyższych wartości obciążeń) oraz różne masy wagonu;</p> | <p>A.2. siła rozciągająca 300 [kN] wg badania normatywnego. Założono, że siła ta ma charakter statyczny i nie występuje cyklicznie w warunkach eksploatacji, stąd kryterium dla tej analizy jest nieprzekroczenie wartości R_m dla elementów konstrukcji z pominięciem punktów osobliwych;</p> |
|--|---|

- B. sprzęg z wadami montażu (niekompletny lub z luźnymi elementami):
- B.1. sprzęg bez 1 klina z 6 nitami przy obciążeniu jak w A.1.;
- B.2. sprzęg bez 1 klina z 4 nitami przy obciążeniu jak w A.1.

Kryteria doboru maksymalnej masy ciągniętej przy użyciu badanego sprzęgu tramwajowego

Biorąc pod uwagę zarówno maksymalne przyspieszenia, jakim poddawany jest wagon w trakcie eksploatacji (wg danych producenta), jak i wymagań normy PN-91/K-88250-4 analizy wytrzymałościowe przeprowadzono dla obu kryteriów, tj. K.1 i K.2.

K.1 Bazując na dostarczonych danych dotyczących zahamowań roboczych ($1,8 [m/s^2]$) oraz przyspieszeń eksploatacyjnych ($1,4 [m/s^2]$), założono, że maksymalne wartości naprężeń wynikające z analiz nie mogą przekroczyć R_m z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa „n”, mówiącym, ile razy naprężenie σ występujące podczas normalnej pracy konstrukcji jest mniejsze od naprężenia niebezpiecznego σ_n . Zakładając, że awaria układu hamulcowego może nastąpić zarówno w wagonie napędowym, jak i w ciągniętym, obliczenia prowadzone były dla wartości $1,8 [m/s^2]$ zarówno dla ściskania, jak i rozciągania. Dla tego kryterium siłę działającą na sprzęg wyznaczono z zależności (1):

$$F [N] = m \times a \quad (1)$$

gdzie:

m - masa wagonu [kg]

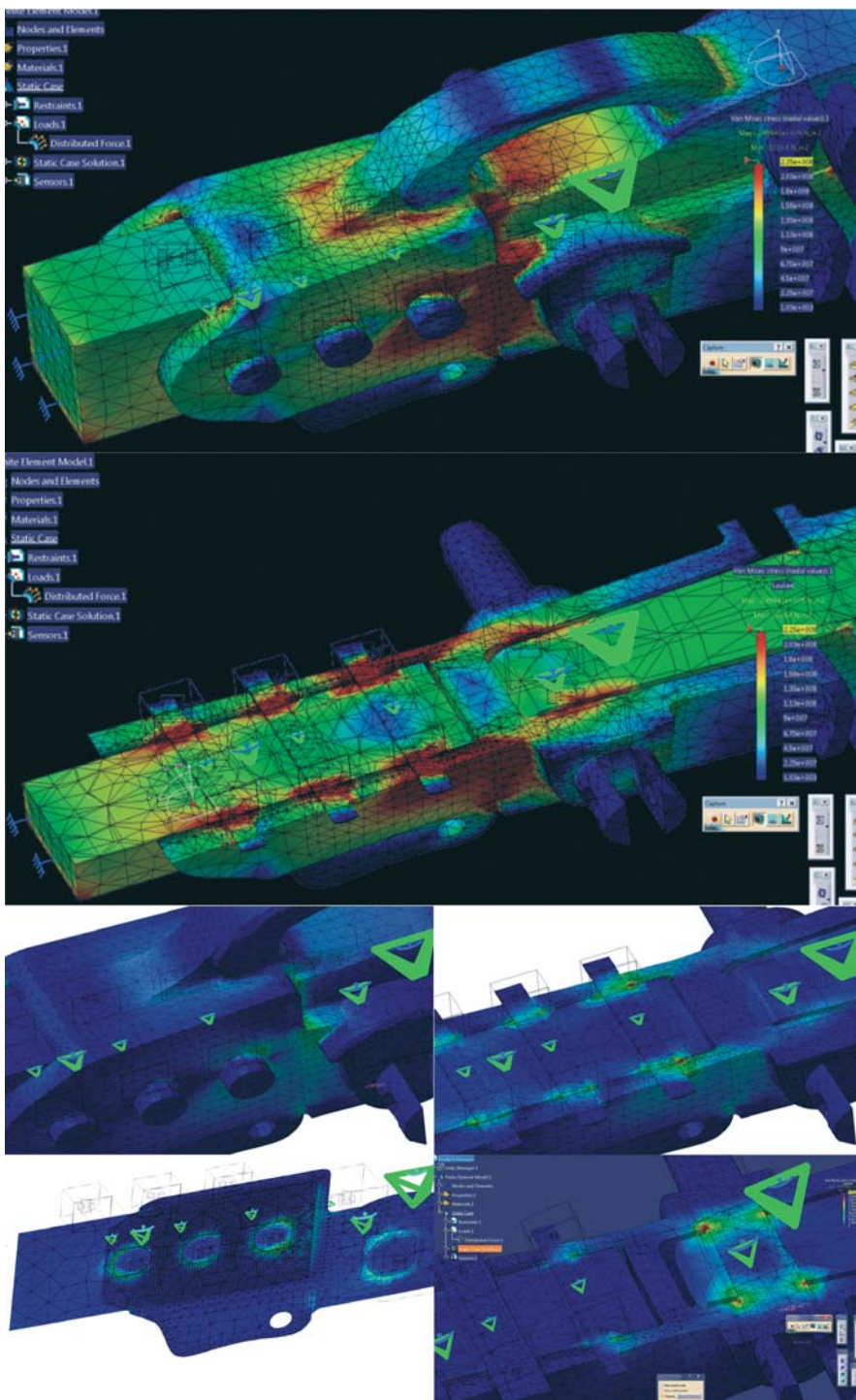
a - przyspieszenie zahamowania roboczego [m/s^2]

Założono, że liczba cykli dla maksymalnej wartości przyspieszeń jest relatywnie mała, dlatego też nie ma potrzeby stosowania kryterium zmęczeniowego, tj. wykresu Wöhlera, który przedstawia zależność pomiędzy wartością naprężeń niszczących dla danego materiału a ilością cykli zmian obciążenia danej konstrukcji.

K.2. Obciążenia wynikające z testu dopuszczenia sprzęgu do użytkowania – opisane w normie PN-91/K-88250-4 punkt 3,5 tj. 100 i 300 [kN] – również nie mają charakteru zmiennego, a jedynie jednorazowy test obciążeń z wyraźnie

określonym kryterium dopuszczenia, tj. brak odkształceń trwałych i pęknięć (dla 100 [kN]) oraz brak pęknięć lub zerwania sprzęgu (dla 300 [kN]), dlatego też w trakcie obliczeń numerycznych wzięto powyższe kryterium z założeniem, że wartość 300 [kN] wynika z całkowitej masy pojazdu ciągniętego wraz z pasażerami i analizując możliwość dopuszczenia większych mas ciągniętych, zwiększano wartość siły stosowanie do masy pojazdu wraz z pasażerami.

W trakcie analizy brano również pod uwagę możliwość wystąpienia obciążenia, jakie powstaje w trakcie hamowania służbowego przy jednoczesnej awarii układu hamulcowego w wagonie ciągniętym. Jednak z kryterium tego zrezygnowano, zakładając sytuację hamowania służbowego przy jednoczesnej awarii układu hamulcowego i to wyłącznie jednego z wagonów (jako mało prawdopodobną i nieuzasadnioną w warunkach normalnej eksploatacji).



Rys. 4. Widok przekroju modelu MES sprzęgu tramwajowego wykonany w programie CATIA

Analiza uzyskanych wyników badań numerycznych sprzęgu tramwajowego oraz wnioski

W tabeli 1 zestawiono wartości obciążeń maksymalnych spełniających kryteria zdefiniowane w punkcie 4.

Należy w tym miejscu wspomnieć, że w uzyskanych na podstawie analizy MES wynikach nie brano pod uwagę punktów osobliwych, w tym naprężeń występujących na krawędziach materiału, które w modelu CAD celowo odwzorowano bez niewielkich zaokrągleń wynikających z narzędzi wykorzystanych w procesie technologicznym.

Uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych MES wartości maksymalnej masy wagonu ciągniętego stanowią maksymalne obciążenie badanego sprzęgu tramwajowego przy założonych danych wejściowych oraz przyjętych kryteriach dopuszczeniowych, które według aktualnej wiedzy autorów stanowią ekstremalne wartości obciążeń, jakie mogą pojawić się w warunkach eksploatacji. Założono również poprawny montaż i utrzymanie sprzęgu tramwajowego oraz własności materiałowych przy zapewnieniu należytych reżimów użytkowania (w tym prowadzenia pojazdu).

Dla powyższych założeń uzyskano informację, że granica plastyczności materiału głowicy zostaje przekroczona dla obciążenia odpowiadającego nominalnej masie wagonu ciągniętego **44 [t]**. Biorąc jednak pod uwagę założony współczynnik bezpieczeństwa na poziomie $n=1,5$ (brak wymogów formalnych – na podstawie danych literaturowych), można wnioskować, że maksymalna masa ciągnięta (wraz z pasażerami) wagonu z wykorzystaniem badanego sprzęgu (kompletnego i poprawnie zamontowanego) nie powinna przekroczyć **29,3 [t]**. Współczynnik bezpieczeństwa dobrano wg zaleceń literaturowych [2, s. 600, tab. 23.3], gdzie zaleca się przyjmować wartość 1,4–1,7 dla „normalnej dokładności obliczeń przy braku danych doświadczalnych określających siły obciążające i stan naprężenia oraz dla średniej jakości materiału i średniej jakości zabiegów technologicznych”.

Tab. 1

Zestawienie uzyskanych wyników obliczeń MES badanego sprzęgu tramwajowego

Nr	Kryterium	Wariant	Kryterium	Uzyskana maksymalna masa ciągniętego wagonu [t] dla		
				sprzęgu kompletnego	sprzęgu bez 2 z 6 nitów	sprzęgu bez 1 klina
1	K.1	Hamowanie robocze 1,8 [m/s ²] - ściskanie	0,5 R _m (225 MPa)	63	44,2	22
2		Hamowanie robocze 1,8 [m/s ²] - rozciąganie		44	35	18
4	K.2	Test wg PN-91/K-88250-4, punkt 3,5(rozciąganie):9,81 [m/s ²]	R _m (450 MPa)	44	-	-

Dobrana wartość współczynnika bezpieczeństwa jest wysoka, gdyż zakłada brak dokładnych danych doświadczalnych dotyczących rzeczywistych obciążeń. Jednocześnie zakładane przeciążenia na poziomie 1,8 [m/s²] są wartościami katalogowymi podanymi przez producentów, dlatego też uznano za celowe kontynuację ww. badań i przeprowadzenie pomiaru rzeczywistych sił działających w trakcie eksploatacji z wykorzystaniem czujników tensometrycznych oraz rejestratora z lokalizacją GPS. Planowane badania doświadczalne pozwolą z jednej strony na uzyskanie faktycznego stanu sił działających na badany element, z drugiej strony pozwolą na zmniejszenie wartości współczynnika bezpieczeństwa na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej sił obciążających badany układ.

Należy zaznaczyć, że maksymalne wartości naprężeń HMH zaobserwowano w miejscu połączenia nitowanego, a nie w otoczeniu klinów. Największe naprężenia stwierdzono w otworze nitu usytuowanego najbliżej części środkowej głowicy, tj. obok klina łączącego – rys. 4. Dlatego też w trakcie wytwarzania, a następnie montażu i utrzymania, należy brać pod uwagę szczególnie wysokie obciążenia tego połączenia i jego wpływ na bezpieczeństwo wynikające z jego eksploatacji.

W ramach realizowanych prac zaktualizowano również dokumentację techniczną badanego sprzęgu tramwajowego na podstawie wykonanych modeli przestrzennych w środowisku CAD. Jednocześnie, ze względu na duże

znaczenie dokładności wykonania otworów stożkowych, a w szczególności ich rozstawu w głowicy, uznano za celowe naniesienie zmian na rysunku 2 normy PN-91/K-88250-4 i uwzględnienie tolerancji ich wykonania, w szczególności dla wymiaru o wartości nominalnej 188 [mm].

Niniejsza praca została wykonana przez pracowników Katedry Transportu Szynowego Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej wraz ze Studenckim Kołem Naukowym C.A.D., działającym przy Katedrze Transportu Szynowego na zlecenie firmy SOMAR sp. z o.o. dla Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej w Warszawie. Korzystając z możliwości, dziękujemy Panu Franciszkowi Lipińskiemu za inspirację do podjęcia ww. analiz oraz fachową pomoc w realizowanej pracy badawczej.

Bibliografia

- [1] <http://linie1-krefeld.de/index.php/fahrzeugebersicht/tw93-details/62-veraenderungen?showall=&start=1> (dostęp z dnia 13.01.2014 r.).
- [2] Jakubowicz A., Orłós Z., *Wytrzymałość materiałów*, WNT, Warszawa 1984.
- [3] *Rekonstrukcja i weryfikacja parametrów eksploatacyjnych głowicy sprzęgu tramwajowego* [praca badawcza], Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Transportu Szynowego, U733/RT4/2013.
- [4] *Tabor tramwajowy. Urządzenie sprzęgające tramwajowego międzywagonowego sprzęgu*, Norma branżowa PN-91/K-88250-4.