

Maciej BOLDYS

## OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI WZMOCNIEŃ ELEMENTÓW NOŚNYCH MASZYN I URZĄDZEŃ

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono możliwości zwiększenia wytrzymałości konstrukcji nośnych maszyn i pojazdów. Określono wpływ rozwiązań konstrukcyjnych i zastosowanych materiałów na wytrzymałość oraz nośność węzłów konstrukcyjnych. Badaniom i symulacjom numerycznym poddano różne aplikacje profili zimnogiętych C i  $\Omega$  w postaci wzmocnień pionowo-poziomych.

## CONSTRUCTION OPTIMIZATION OF THE STRENGTHENING OF BEARING ELEMENTS OF MACHINES AND INSTALLATIONS

**Summary.** In work there were presented strength increase possibilities of load-bearing structure of machines and vehicles. It was determined an effect of constructional solutions and used material on strength and capacity of constructional nodes. There were put on tests and numerical simulations various applications of cold-formed shapes C and  $\Omega$  in the form of vertical-horizontal strengthening.

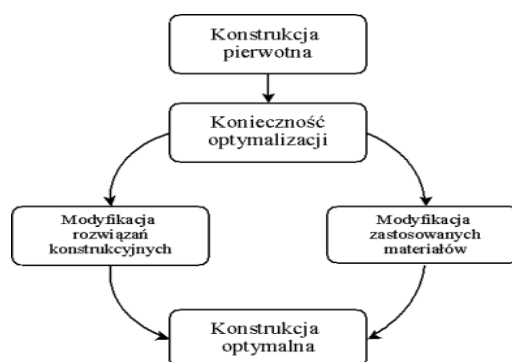
### 1. WSTĘP

Od nowoczesnych pojazdów i urządzeń wymaga się spełnienia szeregu cech, takich jak:

- wysoka wytrzymałość konstrukcji,
- wysoka stateczności konstrukcji,
- spełnienie rygorystycznych norm bezpieczeństwa,
- zmniejszenie masy.

Spełnienie powyższych cech wymaga modyfikacji konstrukcji, czego dokonać można poprzez (rys. 1):

- 1) optymalizację rozwiązań newralgicznych węzłów,
- 2) modyfikację gatunku stosowanych materiałów,
- 3) zastosowanie obu metod wspólnie.

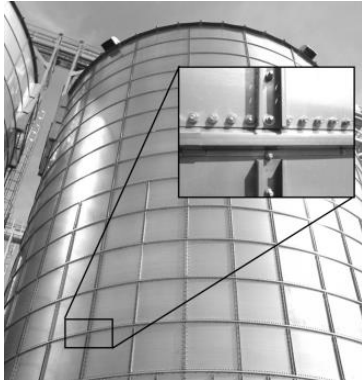


Rys. 1. Schemat optymalizacji konstrukcji

Fig. 1. Diagram of construction optimization

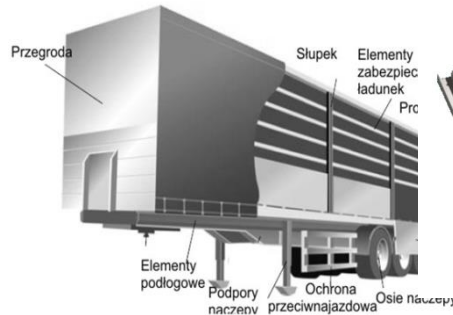
Przedstawiona praca ma wykazać korzyści płynące z zastosowania alternatywnych rozwiązań węzłów konstrukcyjnych oraz z wprowadzenia do konstrukcji nowoczesnych stali wysoko wytrzymałych. W tym celu przeprowadzono badania i ich analizę z zastosowaniem MES. Badaniom poddano cztery warianty wykonania tego samego węzła konstrukcyjnego przy zastosowaniu dwóch alternatywnych materiałów konstrukcyjnych: stali niestopowej oraz stali wysokowytrzymałej.

Obiektami badań były elementy nośne wykorzystywane w konstrukcjach magazynów (rys. 2). Podobne rozwiązania konstrukcyjne wykorzystywane są w konstrukcjach poszycić przestrzeni ładunkowych pojazdów użytkowych (rys. 3 i 4) jak również w konstrukcjach kontenerów towarowych.



Rys. 2. Konstrukcja wzmocnień magazynów

Fig. 2. Strengthening construction of magazines



Rys. 3. Konstrukcja poszycia naczepy

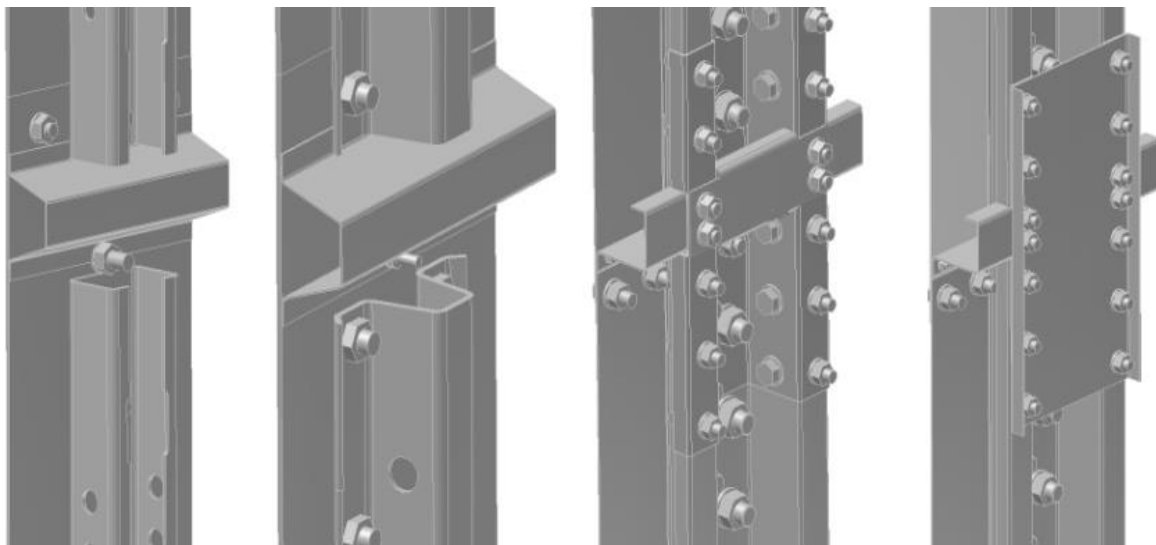
Fig. 3. Panelling construction of semi-trailer



Rys. 4. Konstrukcja poszycia podłogi przestrzeni ładunkowej

Fig. 4. Floor plating-construction of cargo space

Rozpatrywane wzmocnienia przenoszą zarówno siły pionowe, jak i poziome. W wyniku złożonego stanu obciążeń newralgicznym węzłem konstrukcyjnym w rozpatrywanych wzmocnieniach są łączenia słupów pionowych z poziomymi poprzeczkami (rys. 5). W miejscach tych występuje nieciągłość, która przyczynia się w sposób bezpośredni do zmniejszenia nośności konstrukcji oraz powoduje zmniejszanie współczynnika bezpieczeństwa.



Rys. 5. Newralgiczne węzły konstrukcyjne badanych wzmocnień

Fig. 5. Neuralgic construction-nodes of tested strengthening

## 2. BADANIA

Celem badań było określenie nośności wzmocnień stosownych w budowie pojazdów i maszyn. Obiektami badań były cztery typy wzmocnień (rys. 6-9), wykonane z zimnociętych kształtowników typu C i  $\Omega$ . Elementy były połączone ze sobą za pomocą złączy śrubowych. Pomiędzy słupami pionowymi umocowane były poszycia wykonane z arkuszy blach, ze stali niestopowej S355JR z powłoką galwaniczną. Właściwości mechaniczne zastosowanego gatunku stali przedstawiono w tabelicy 1. Podstawowe wymiary wzmocnień przedstawiono w tabelicy 2.



Rys. 6. Wzmocnienie pierwsze (WZ1)-widok

Fig. 6. First strengthening (WZ1) – a view



Rys. 7. Wzmocnienie drugie (WZ2)-widok

Fig. 7. Second strengthening (WZ1) – a view



Rys. 8. Wzmocnienie trzecie (WZ3)-widok

Fig. 8. Third strengthening (WZ1) – a view



Rys. 9. Wzmocnienie czwarte (WZ4)-widok

Fig. 9. Fourth strengthening (WZ1) – a view

Tabela 1

Właściwości stali S355JR

Gatunek stali	Właściwości materiału				
	Granica plastyczności, $R_e$ , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie, $R_m$ , MPa	Wydłużenie, $A_{10}$ , %	Moduł Younga $E$ , GPa	Moduł Poissona $\nu$
S355JR	355	470÷630	27	210	0,27

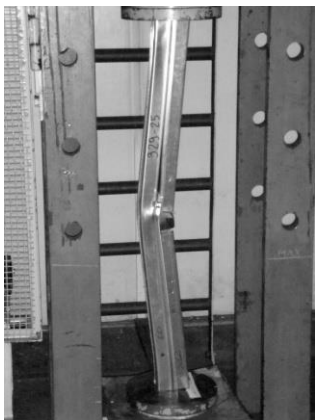
Tabela 2

Podstawowe wymiary badanych wzmocnień

Typ wzmocnienia	Wymiary, mm			Powierzchnie przekrojów, mm <sup>2</sup>	
	Wysokość, H	Szerokość, B	Szerokość poprzeczna, L	Maksymalne pole przekroju, $P_{max}$	Minimalne pole przekroju, $P_{min}$
WZ1	1200	200	103	1742	1371
WZ2	1200	200	95,5	1744	1372
WZ3	1200	320	78	1401*	1038
WZ4	1200	320	79	1606*	1038

\*-Maksymalne pole przekroju występuje w miejscu połączeń słupów i poprzeczek.

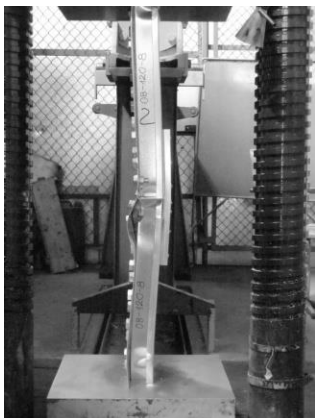
Próby ściskania wzmocnień przeprowadzono dla czterech typów wzmocnień (rys. 10-13) i trzykrotnie powtórzono w celu określenia wartości średnich. Uzyskane wykresy siły w funkcji czasu pokazano na rysunkach 14-17. Maksymalne wartości siły  $F_{max}$  dla różnych typów wzmocnień zebrano w tabelicy 3.



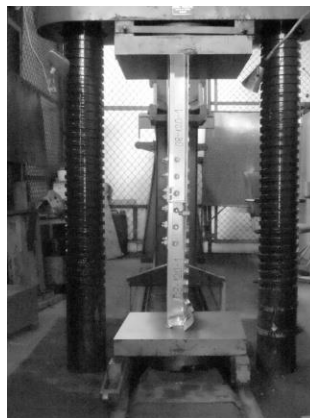
Rys. 10. Próba ściskania wzmocnienia WZ1  
Fig. 10. Compression test of strengthening WZ1



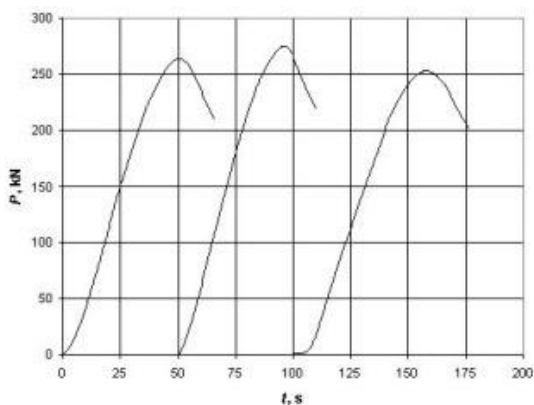
Rys. 11. Próba ściskania wzmocnienia WZ2  
Fig. 11. Compression test of strengthening WZ2



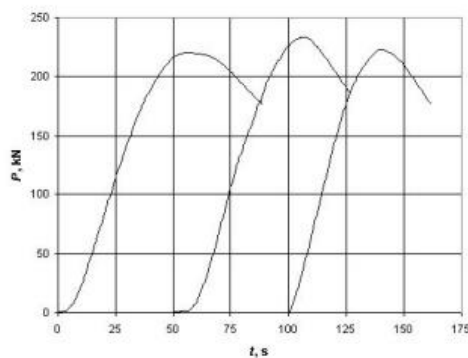
Rys. 12. Próba ściskania wzmocnienia WZ3  
Fig. 12. Compression test of strengthening WZ3



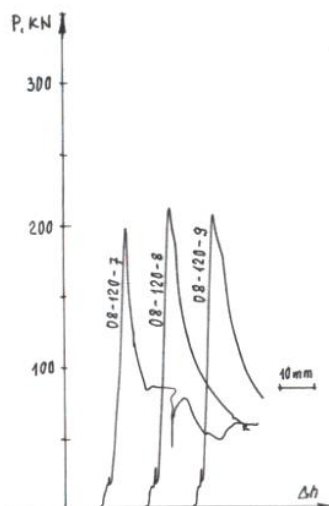
Rys. 13. Próba ściskania wzmocnienia WZ4  
Fig. 13. Compression test of strengthening WZ4



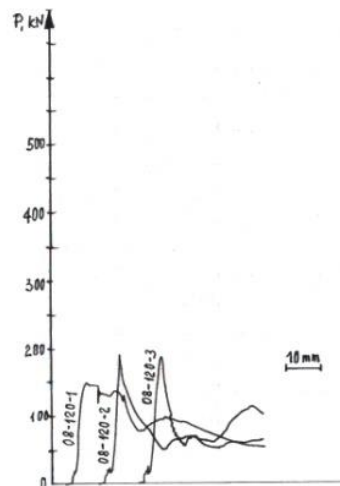
Rys. 14. Zależność siły w funkcji czasu dla WZ1  
Fig. 14. Force dependence in time function for WZ1



Rys. 15. Zależność siły w funkcji czasu dla WZ2  
Fig. 15. Force dependence in time function for WZ2



Rys. 16. Zależność siły w funkcji czasu dla WZ3  
Fig. 16. Force dependence in time function for WZ3



Rys. 17. Zależność siły w funkcji czasu dla WZ4  
Fig. 17. Force dependence in time function for WZ4

Tablica 3

Wyniki badań nośności wzmocnień

Typ wzmocnienia	Siła maksymalna $F_{max}$ , kN				Uwagi
	Próba 1	Próba 2	Próba 3	Wartość średnia	
WZ1	269	253	275	266	Złamanie w połowie wysokości
WZ2	218	235	227	227	Złamanie w połowie wysokości
WZ3	199	213	208	207	Złamanie w połowie wysokości
WZ4	150	192	188	177	Złamanie w dolnej części wzmocnienia

3. SYMULACJE

Celem symulacji z zastosowaniem MES było określenie wpływu materiału konstrukcyjnego na nośność wzmocnień. Do obliczeń numerycznych przyjęto modele odpowiadające wcześniej opisanym wzmocnieniom. Jako materiał konstrukcyjny przyjęto dwufazową stal wysokowytrzymałą gatunku LITEC 800DP, o własnościach mechanicznych podanych w tablicy 4.

Tablica 4

Własności stali LITEC 800DP

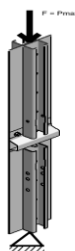
Gatunek stali	Własności materiału				
	Granica plastyczności, $R_{p0,2}$ , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie, $R_m$ , MPa	Wydłużenie, $A_{80}$ , %	Moduł Younga E, GPa	Moduł Poissona $\nu$
LITEC 800 DP	450÷560	780	14	228	0,3

Przyjęty model obciążenia i utwierdzenia pokazano na rysunku 18. W trakcie symulacji model obciążano maksymalną siłą, która nie powodowała przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ . W tabelicy 5 przedstawiono ilość elementów skończonych i węzłów wygenerowanych w trakcie symulacji.

Tablica 5

## Właściwości modeli wzmocnień

Model wzmocnienia	Ilość elementów skończonych	Ilość węzłów
WZ1	26571	57542
WZ2	34794	76257
WZ3	106248	228978
WZ4	111716	241559

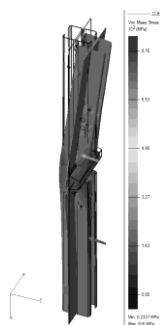


Rys. 18. Model obciążenia i utwierdzenia

Fig. 18. Load and restrain model

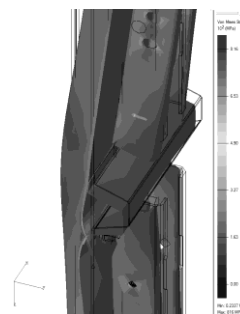
Przeprowadzone symulacje umożliwiły określenie wartości zmiany nośności wzmocnień przy zastosowaniu alternatywnego materiału konstrukcyjnego, jakim jest stal wysokowytrzymała gatunku LITEC 800DP zamiast S355JR.

Wyniki symulacji przedstawione zostały na rysunkach 19-34.



Rys. 19. Wzmocnienie WZ1: naprężenia główne.

Fig. 19. WZ1 strengthening: principal stress



Rys. 20. Wzmocnienie WZ1: naprężenia główne w środku wzmocnienia

Fig. 20. WZ1 strengthening: principal stress in the middle of the strengthening



Rys. 21. Wzmocnienie WZ1: przemieszczenia

Fig. 21. WZ1 strengthening: displacements

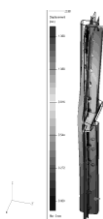


Rys. 22. Wzmocnienie WZ1: odkształcenia

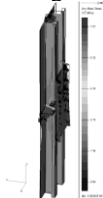
Fig. 22. WZ1 strengthening: strains



Rys. 23. Wzmocnienie WZ2: naprężenia główne.  
Fig. 23. WZ2 strengthening: principal stress



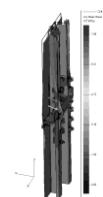
Rys. 25. Wzmocnienie WZ2: przemieszczenia  
Fig. 25. WZ2 strengthening: displacements



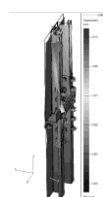
Rys. 27. Wzmocnienie WZ3: naprężenia główne  
Fig. 27. WZ3 strengthening: principal stress



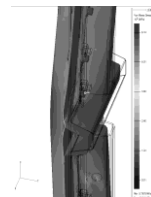
Rys. 29. Wzmocnienie WZ3: przemieszczenia  
Fig. 29. WZ3 strengthening: displacements



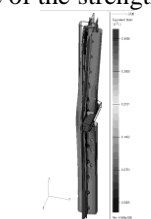
Rys. 31. Wzmocnienie WZ4: naprężenia główne  
Fig. 31. WZ4 strengthening: principal stress



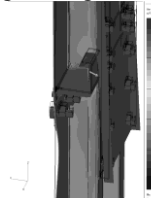
Rys. 33. Wzmocnienie WZ4: przemieszczenia  
Fig. 33. WZ4 strengthening: displacements



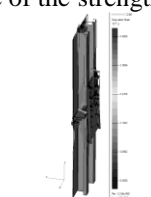
Rys. 24. Wzmocnienie WZ2: naprężenia główne w  
środku wzmocnienia  
Fig. 24. WZ2 strengthening: principal stress in  
the middle of the strengthening



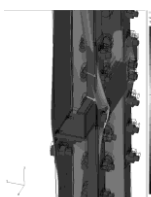
Rys. 26. Wzmocnienie WZ2: odkształcenia  
Fig. 26. WZ2 strengthening: strains



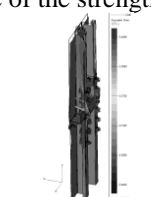
Rys. 28. Wzmocnienie WZ3: naprężenia główne w  
środku wzmocnienia  
Fig. 28. WZ3 strengthening: principal stress in  
the middle of the strengthening



Rys. 30. Wzmocnienie WZ3: odkształcenia  
Fig. 30. WZ3 strengthening: strains



Rys. 32. Wzmocnienie WZ4: naprężenia główne w  
środku wzmocnienia  
Fig. 32. WZ4 strengthening: principal stress in  
the middle of the strengthening



Rys. 34. Wzmocnienie WZ4: odkształcenia  
Fig. 34. WZ4 strengthening: strains

Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych zestawiono w tablicy 6. Określono także wzrost nośności wzmocnienia po zastosowaniu w ich konstrukcji stali wysokowytrzymałej.

Tablica 6

## Porównanie nośności badanych wzmocnień

Wzmocnienie	Maksymalna siła niszcząca, kN		Zmiana wartości siły, %
	Stal niestopowa S355 (badania eksperymentalne)	Stal wysokowytrzymała LITEC 800DP (symulacje numeryczne)	
WZ1	266	270	2
WZ2	227	265	17
WZ3	207	235	14
WZ4	177	200	13

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych sformułowano następujące wnioski:

- Zastosowanie zinnogiętych kształtowników typu C i  $\Omega$  w konstrukcjach nośnych umożliwia uzyskanie wysokiej wytrzymałości wzmocnień.
- Wszystkie połączenia śrubowe powinny być dokręcone z właściwym momentem obrotowym. W przeciwnym razie występuje gwałtowny spadek nośności wzmocnienia poprzez poślizg poszczególnych elementów konstrukcyjnych.
- Zastosowanie profili typu C (WZ1) umożliwia uzyskanie największych nośności wzmocnień.
- W przypadku wzmocnień wykonanych z profili C (WZ1) odnotowano najmniejszy (2%) wzrost wytrzymałości po zastosowaniu stali wysokowytrzymałej.
- Największy wzrost nośności (17%) przy zastosowaniu stali wysokowytrzymałej odnotowano w przypadku wzmocnienia WZ2, wykonanego z profili typu  $\Omega$ .
- Konstrukcje wykonane jako zamknięte (WZ3 i WZ4) nie wykazały zwiększenia wytrzymałości. Fakt ten spowodowany był większą ilością otworów i złącz śrubowych.
- Wzmocnienia z otwartym węzłem konstrukcyjnym (WZ1 i WZ2) charakteryzowały się bardzo gwałtownym zmniejszeniem nośności po przekroczeniu wartości granicznych. Elementy wykonane jako zamknięte (WZ3 i WZ4) po przekroczeniu wartości granicznych odznaczały się większą statecznością.
- Zastosowanie stali wysokowytrzymałej gatunku LITEC 800DP umożliwi uzyskanie wyższych własności wytrzymałościowych wzmocnień w porównaniu do wzmocnień wykonanych ze stali S355JR.
- Wartość pola przekroju nie ma wpływu na nośność badanych wzmocnień. Większy wpływ mają sposoby połączeń elementów i typy zastosowanych kształtowników.

Recenzent: Dr hab. inż. Eugeniusz Hadasik