

## BADANIA PORÓWNAWCZE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH ZE STALI WYSOKO WYTRZYMAŁYCH STOSOWANYCH NA KONSTRUKCJE POJAZDÓW SPECJALNYCH

### Streszczenie

W artykule przedstawiono badania wytrzymałości na rozciąganie i badania zmęczeniowe wysokowytrzymałej stali S960QL i jej połączeń spawanych realizowane w temperaturze pokojowej. Badania trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej pracującej w pętli sprzężenia zwrotnego. Badania zmęczeniowe realizowano na spawanych połączeniach czołowych i nakładkowych wykonanych ze stali S960QL. Obliczenia trwałości zmęczeniowej zostały wykonane z uwzględnieniem naprężenia nominalnego. Uzyskane wyniki obliczeniowe porównano z wynikami eksperymentu. Została zauważona znacząca obniżenie trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych, szczególnie dla połączenia nakładkowego.

### WSTĘP

We współczesnym przemyśle transportowym obserwuje się trend do stosowania materiałów o korzystnym stosunku masy do wytrzymałości. Stale wysokowytrzymałe zostały powszechnie zastosowane do budowy elementów konstrukcyjnych aut i pojazdów specjalnych w celu poprawy wytrzymałości konstrukcji, bez zwiększenia masy całego ustroju nośnego ze względu na silne wymagania dotyczących zużycia paliwa, oszczędności energii i odporności na zderzenia [1-2]. Wymagania te spełniają stale o wysokiej wytrzymałości uzyskiwane przez skomponowanie właściwego składu chemicznego jak również precyzyjnie ustalone warunki obróbki plastycznej i cieplnej, przez co uzyskuje stale o różnej wysokości granicy plastyczności w zakresie od 460 do 1300 MPa. Bardzo dobrym przykładem stali o wysokiej wytrzymałości jest S960QL XABO 960 [3], która oprócz wysokiej maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie zapewnia dobre właściwości spawalnicze i gięcia. Wysokowytrzymała stal S960QL przeznaczona jest do pracy w ekstremalnych obciążeniach odpowiedzialnych konstrukcji począwszy od dużych transporterów poprzez stalowe konstrukcje nośne do mobilnych dźwigów [4].

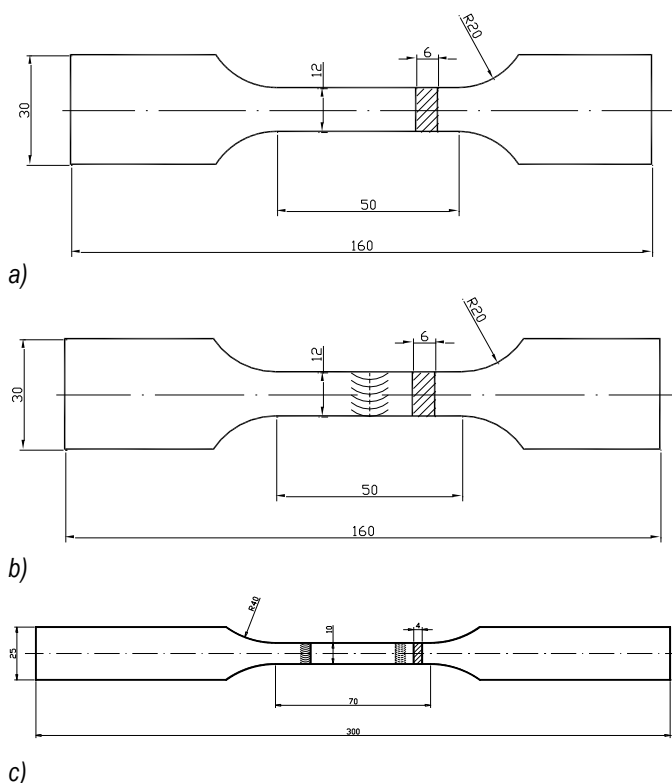
Współczesne wymagania dotyczące konstrukcji pojazdów specjalnych są sukcesywnie podnoszone. Zmęczenie spawanych konstrukcji stalowych ustrojów nośnych jest ważnym i trudnym zagadnieniem dla konstruktorów. W praktyce nośność konstrukcji spawanej zależy od nośności połączenia spawanego. Połączenie tego typu należy uważać za niewralgiczny węzeł konstrukcji zwłaszcza w warunkach obciążeń zmiennych, jakie występują w pojazdach i maszynach roboczych.

W artykule zaprezentowano wyniki porównawczych badań zmęczeniowych stali S960QL i połączeń spawanych z niej wykonanych.

### 1. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Przeprowadzone badania miały na celu weryfikację podstawowych parametrów wytrzymałościowych badanych stali oraz wpływ rodzaju połączenia spawanego na wytrzymałość zmęczeniową złączy stosowanych w pojazdach specjalnych.

Przedmiotem badań były próbki wykonane z materiału rodzimego oraz próbki ze spoiną czołową i połączenie nakładkowe (rys. 1).



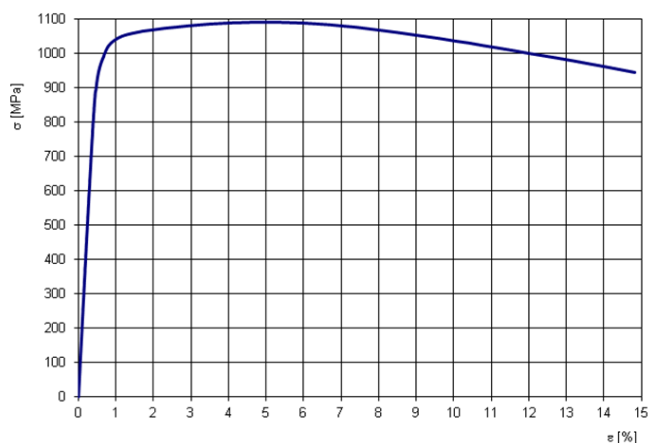
Rys. 1. Próbkę stosowane do badań:

a) z materiału rodzimego, b) ze spoiną czołową, c) połączenie nakładkowe

W wyniku przeprowadzonych prób monotonicznego rozciągania uzyskano krzywe  $\sigma = f(\varepsilon)$  dla badanych stali (rys. 2). Średnie wartości wyników tych prób przedstawiono w tabeli 1. Badania te wykazały wysoką jakość badanej stali, zgodną z wymaganiami normatywnymi [3]

Tab. 1. Wartości średnie uzyskanych wyników prób monotonicznego rozciągania [1, 2]

Gatunek stali	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>u</sub> [MPa]	A [%]	Z [%]	E [GPa]
S960QL	1000	1090	2209	14	38	208



Rys. 2. Wykres monotonicznego rozciągania stali S960QL

W celu uzyskania pełnej charakterystyki stali przeprowadzone zostały badania zmęczeniowe w pełnym zakresie liczby cykli. Badania przeprowadzono przy obciążeniu odzerowotępnym, przy stałej wartości naprężenia oraz częstotliwości cykli 0,5 Hz. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej opracowano statystycznie zgodnie z normą ASTM E739-91: „Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data” [6]. Opracowane wyniki badań posłużyły do zbudowania wykresów zmęczeniowych.

Na rys. 3. zaprezentowano wyniki badań trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych ze stali S960QL. Zestawiono wyniki badań próbek z materiału rodzimego z próbkami połączonymi dwoma typami złącza spawanego: spoiną czołową (połączenie spawane) i spoiną pachwinową (połączenie nakładkowe). Jak pokazano na wykresie (rys 3), połączenia spawane ze spoiną nakładkową charakteryzują się wyraźnie niższą trwałością zmęczeniową. Spadek trwałości próbek z połączeniem nakładkowym dochodzi do 90%.

## 1. OBLICZENIOWA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA WG KRYTERIUM ODKSZTAŁCENIOWEGO

Dla cyklicznego obciążenia zakres odkształcenia w karbie  $\Delta\epsilon_k$  oblicza się z zależności [7]:

$$\Delta\epsilon_k = \alpha_\epsilon \cdot \Delta\epsilon_N \quad (1)$$

gdzie:

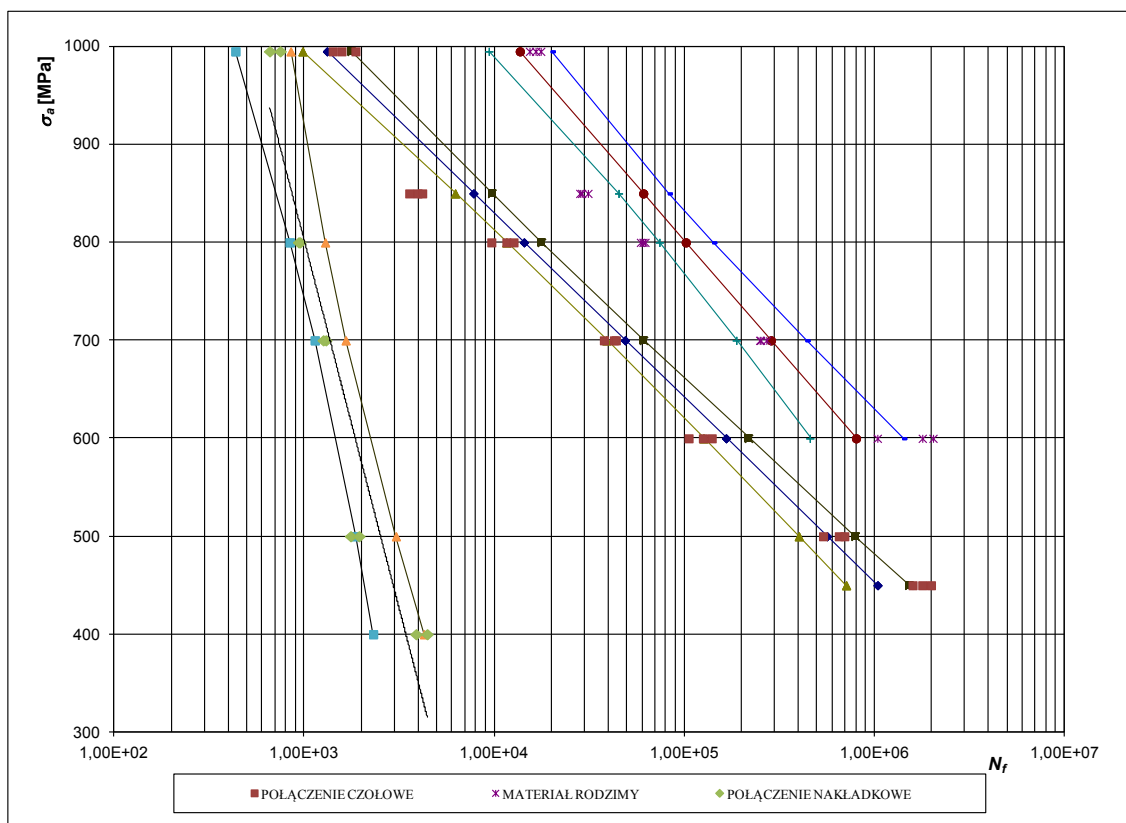
- $\Delta\epsilon_N = \frac{\Delta\sigma_N}{E}$  - odkształcenie dla zakresu naprężeń nominalnych
- $\Delta\sigma_N = \sigma_{Nmax} - \sigma_{Nmin}$  - zakres naprężeń nominalnych poza karbem
- $\alpha_\epsilon$  - współczynnik spiętrzenia odkształcenia
- E - moduł Young'a

Współczynnik spiętrzenia odkształcenia  $\alpha_\epsilon$  w karbie wyznacza się z zależności:

$$\alpha_\epsilon = \frac{\alpha_k^{1+n'} \cdot \bar{\Delta\sigma}_N^{1+n'}}{(\alpha_k \cdot \bar{\Delta\sigma}_N)^{1+n'} \cdot a \cdot (1-n') \cdot \left(1 - \frac{\bar{\Delta\sigma}_N}{\alpha_k}\right)} \quad (2)$$

gdzie:

- $\alpha_k$  - współczynnik kształtu
- a - stała materiałowa (a=0 lub a=0,5)
- n' - wykładnik cyklicznego umocnienia
- $\Delta\sigma_N$  - zakres naprężeń nominalnych poza karbem
- $\bar{\Delta\sigma}_N = \frac{\Delta\sigma_N}{(1-R) \cdot R_e}$  - dla cyklu niesymetrycznego
- $R_e$  - granica plastyczności.



Rys. 3. Wykres trwałości zmęczeniowej stali S960QL i jej połączeń spawanych

Dla badanej stali zakres naprężeń  $\bar{\Delta}\sigma_N = 0,85 \div 0,50$

Współczynniki kształtu  $\alpha_k$  wyznaczony został metodą Lawrence'a i wynosi:

dla połączenia czołowego -  $\alpha_k = 1,4$

dla połączenia nakładkowego -  $\alpha_k = 1,76$

Dla zakresu naprężenia nominalnego  $\bar{\Delta}\sigma_N \leq \frac{1}{\alpha_k}$  współczynniki spiętrzenia naprężeń i odkształceń są równe współczynnikowi kształtu:

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_\sigma = \alpha_k \quad (3)$$

Wytrzymałość zmęczeniową niskocyklową wg kryterium odkształceniowego określa się z warunku:

$$\Delta\varepsilon_k \leq \Delta\varepsilon_o \quad (4)$$

gdzie:

- $\Delta\varepsilon_k$  - obliczeniowy zakres odkształcenia sprężysto-plastycznego w karbie wywołany obciążeniem zmiennym
- $\Delta\varepsilon_o$  - obliczeniowy zakres odkształcenia sprężysto-plastycznego dla założonej liczby cykli obciążenia

Zakres odkształcenia  $\Delta\varepsilon_o$  opisuje się zależnością:

$$\Delta\varepsilon_o = \frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}} \left( \frac{2}{2(N_f)^m + \frac{1+R}{1-R}} \cdot \ln\left(\frac{100}{100-Z}\right) + \frac{1,1R_m}{E} \right) \quad (5)$$

gdzie:

$\gamma_{Ff}, \gamma_{Mf}$

- częściowe współczynniki bezpieczeństwa

- uwzględnia stopień dokładności wzorów określających wartości odkształceń oraz niepewność modelu teoretycznego w zakresie obliczeniowej trwałości konstrukcji, aż do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego

$\gamma_{Ff} = 1,5$

- uwzględnia kontrolę i dostęp do głównych węzłów konstrukcji oraz sposób i konsekwencje zniszczenia, a także zmianę własności materiału w obrębie połączenia spawanego

$\gamma_{Mf} = 1,35$

$N_f$

- liczba cykli obciążeń odpowiadająca początkowej fazie pęknięcia zmęczeniowego

$R = \frac{\sigma_{N \min}}{\sigma_{N \max}}$

- współczynnik asymetrii cyklu

m

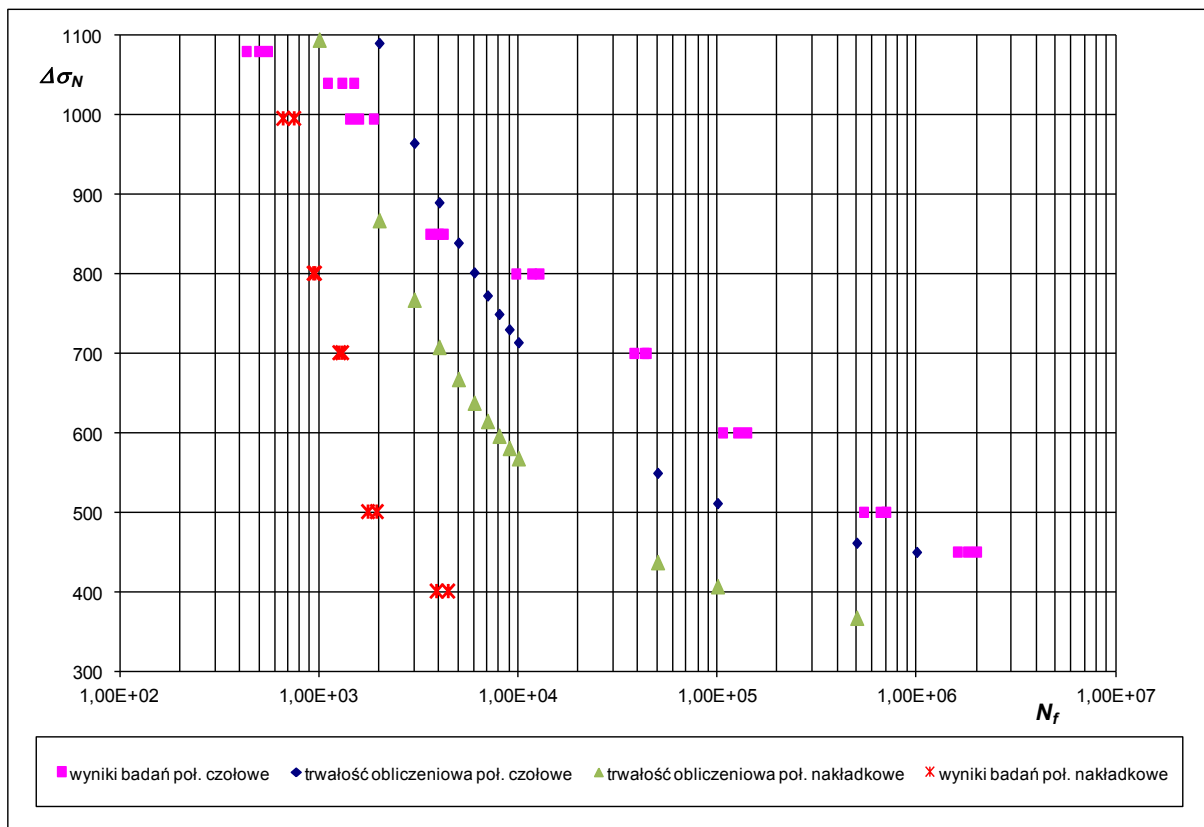
- wykładnik materiałowy ( $m = 0,52$ )

Współczynnik spiętrzenia odkształcenia określony ze wzoru (2) dla wykładnika cyklicznego umocnienia  $n'=0,08$ , wyznaczony na podstawie przeprowadzonych badań, wyraża się zależnością [6]:

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_k^{1,89} \cdot \bar{\Delta}_N^{0,89} \quad (6)$$

Zatem, obliczeniowy zakres odkształcenia sprężysto-plastycznego opisuje wzór:

$$\Delta\varepsilon_o = \frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}} \left( \frac{0,349}{2(N_f)^{0,52} + \eta} + 5,23 \cdot 10^{-3} \right) \quad (7)$$



Rys. 4.. Wykres zależności  $\Delta\sigma_N = f(N_f)$  dla badanych połączeń spawanych ze stali S960QL

$$\text{gdzie: } \eta = \frac{1+R}{1-R}$$

Żywotność połączenia spawanego oblicza się z zależności (8):

$$N_f = \left[ \frac{E}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta \varepsilon_k \cdot E - 1,1 \cdot R_m} \cdot \ln \frac{100}{100-Z} - \frac{1+R}{2(1-R)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

Zakres naprężeń nominalnych poza karbem wyznaczono z zależności (1) przekształconej do postaci (9) przyjmując warunek  $\Delta \varepsilon_k \leq \Delta \varepsilon_o$ , oraz  $\alpha_\varepsilon = \alpha_\sigma = \alpha_k$

$$\Delta \sigma_N = \frac{\Delta \varepsilon_o \cdot E}{\alpha_k} \quad (9)$$

Jak pokazano na wykresie (rys. 4) model obliczeniowy wykorzystujący metodę wyteżenia w dnie karbu spawalniczego możliwy jest do zastosowania dla spawanego połączenia czołowego w niemalże całym przedziale zakresu badań. Jedynie w zakresie niskocyklowym należy zachować pewną rezerwę po przeprowadzonych obliczeniach.

Natomiast odnośnie stosowania omawianej metody do obliczania trwałości połączenia nakładkowego należałoby przeprowadzić dodatkowe analizy mające na celu uwzględnienie pojawiających się sił zginających działających na próbki podczas badań.

## PODSUMOWANIE

Podczas badań zmęczeniowych stwierdzono znaczny spadek trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych w stosunku do materiału rodzimego. Jest to szczególnie widoczne dla połączeń nakładkowych (rys.3). Metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej w oparciu o wyznaczenie odkształceń w dnie karbu daje dobre wyniki dla połączeń czołowych, natomiast dla połączeń nakładkowych wymaga dalszych badań ze względu na występujące w tym przypadku naprężenia zginające. Naprężenia te sumują się z naprężeniami od obciążenia i trwałość połączenia zmniejsza się. Z przeprowadzonych badań wynika, że badane stale wysokowytrzymałe mogą być stosowane do konstrukcji spawanych pojazdów specjalnych po uwzględnieniu ograniczeń wynikających ze spadku ich wytrzymałości zmęczeniowej.

## BIBLIOGRAFIA

- Jiang, Hai-Tao, Di Tang, and Zhen-Li Mi. Latest progress in development and application of advanced high strength steels for automobiles. Gangtie Yanjiu Xuebao (Journal of Iron and Steel Research) 19.8 (2007): 1-6.
- Takahashi, Manabu. "Development of high strength steels for automobiles." Shinnittetsu Giho (2003): 2-6.
- EN 10025-6: Hot rolled products of structural steels Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in quenched and tempered conditions.
- Günther H.P., Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures (Structural Engineering Documents 8), IABSE, 2005
- Goss Cz., Marecki P., *Fatigue test welded joint steel S960QL*, Material Science Forum Vol. 726, Trans Tech Publications, Szwajcaria 2012, s. 93-99.
- Norma ASTM E739-91: „Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\varepsilon$ -N) Fatigue.

- Goss Cz., Kłysz S., Wojnowski W., Problemy niskocyklowej trwałości zmęczeniowej wybranych stali i połączeń spawanych, ITWL, Warszawa 2004.

## COMPARATIVE STUDY HIGH-STRENGTH STEEL WELDED USED IN CONSTRUCTION OF SPECIAL VEHICLES

### Abstract

*In this article, monotonic tension and fatigue tests of S960QL high strength steel and its welded joints were investigated at room temperature. The tests of fatigue life were carried out on a computer-controlled Instron 8802 closed-loop servo-hydraulic test machine. Fatigue experiments were conducted using butt and lap joints of S960QL steel. Calculations of fatigue life were made using the nominal stress method. Obtained result were compared with experimental results. There was a significant reduction in fatigue life of welded joints, especially for lap connections.*

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Czesław GOSS** – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2. Tel +48 26183 92 37, czeslaw.goss@wat.edu.pl;

dr inż. **Paweł MARECKI** - Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2. Tel +48 261 83 72 08, pmarecki@wat.edu.pl;

dr inż. **Tomasz MUSZYŃSKI** - Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2. Tel +48 261 83 97 91, tomasz.muszynski@wat.edu.pl;

dr inż. **Janusz TORZEWSKI** - Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn; 00-908 Warszawa; ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2. Tel +48 261 83 78 99, janusz.torzewski@wat.edu.pl

*Pracę wykonano w ramach projektu UOD-DEM-1-145/001 pt. „Rodzina pojazdów specjalistycznych do prowadzenia zabiegów renowacyjnych i ochronnych w środowisku wodno-błotnym”, finansowanego przez NCBiR.*