

Grzegorz Garbacz
Politechnika Opolska

Lesław Kyzioł
Akademia Morska w Gdyni

**STANOWISKO DO BADANIA
WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ
MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH
W WARUNKACH DZIAŁANIA
CIECZY KORODUJĄCEJ
DLA ZŁOŻONEGO STANU NAPRĘŻEŃ**

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono opis i zasadę działania prototypowego stanowiska badawczego do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję. Badania prowadzono na próbkach w atmosferze otoczenia oraz w środowisku korozyjnym. Wykorzystano głównie materiały przeznaczone na elementy konstrukcji morskich, w tym elementy jednostek pływających. Maszyna do badań zmęczeniowych jest przykładem wykonania urządzenia, na które uzyskano patent.

Słowa kluczowe:

badania zmęczeniowe, maszyna do badań zmęczeniowych, zginanie ze skręcaniem.

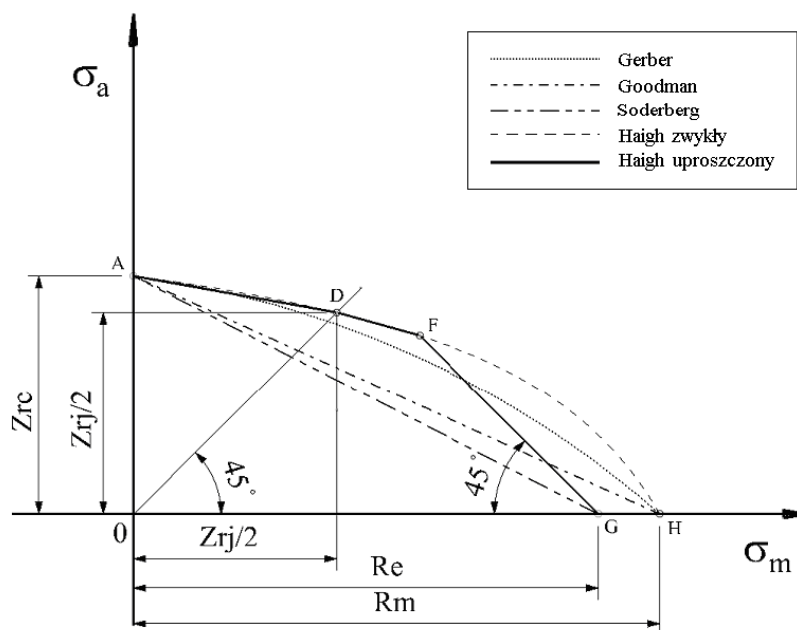
WSTĘP

Na warunki eksploatacyjne elementów maszyn i konstrukcji mechanicznych składają się różnorakie czynniki fizyczne i chemiczne. W szczególności są to statyczne i dynamiczne obciążenia mechaniczne oraz degradujące oddziaływanie środowiska aktywnego chemicznie.

W niniejszym artykule skoncentrowano się na zagadnieniu wyznaczania trwałości zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych poddawanych jednoczesnemu

działaniu cieczy korodującej i obciążeń zmiennych, prezentując prototyp maszyny umożliwiającej wykonywanie testów w takich warunkach.

W zagadnieniach technicznych najczęściej występującym rodzajem zmęczenia jest zmęczenie wieloosiowe. Przypadek ten nie został do tej pory tak dokładnie przedstawiony jak przypadek zmęczenia jednoosiowego opisującego trwałość zmęczeniową. Prowadzone badania nad zmęczeniem wieloosiowym nie stworzyły jednoznacznych zasad opisujących zarówno przypadek nisko-, jak i wysokocyklowy, chociaż podejmowane są próby sformułowania wieloosiowego kryterium dla przypadku nisko- i wysokocyklowego [6, 7, 8].



Rys. 1. Przybliżone zależności między σ_m a σ_a powstałe na podstawie badań różnych autorów: Goodmana, Soderberga, Gerbera, Haigha

Źródło: M. W. Brown, K. J. Miller, *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, MEP London 1989; N. E. Dowling, *Mechanical Behaviour of Materials*, Prentice-Hall Int. Editors Inc., Engelwood Cliffs, 1993; A. Jaworski, *Podstawy mechaniki ciała stałego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999; M. E. Niezgodziński, T. Niezgodziński, *Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn*, PWN, Warszawa 1973.

Dla jednoosiowego stanu obciążenia zależność trwałości zmęczeniowej od amplitudy naprężenia z uwzględnieniem wartości naprężenia średniego została dokładnie przebadana. Na tej podstawie powstało wiele zależności opisujących zmiany

amplitudy naprężeń z naprężeniem średnim (rys. 1.). W przypadku zmęczenia wieloosiowego do opisu zależności naprężenia średniego i amplitudowego wykorzystuje się wielkości będące skalarnymi reprezentacjami aksjatora i dewiatora tensora naprężeń [10].

Uzyskane zależności zmęczeniowe określa się w oparciu o testy przeprowadzone w laboratoriach na próbkach poddanych odpowiednim obciążeniom w zaprojektowanych w tym celu specjalizowanych maszynach zmęczeniowych. Maszyny te pozwalają na badanie próbek z materiałów konstrukcyjnych, w których wytworzony jest wieloosiowy stan naprężenia. Uzyskane z badań wiarygodne wyniki pozwalają na dobór odpowiednich kryteriów określających wytrzymałość zmęczeniową wyznaczoną na bazie badań eksperymentalnych. Kryteria określające wytrzymałość zmęczeniową w złożonym stanie naprężenia można znaleźć między innymi w [1, 2, 4, 5, 14].

BUDOWA I DZIAŁANIE PROTOTYPU MASZYNY ZMĘCZENIOWEJ

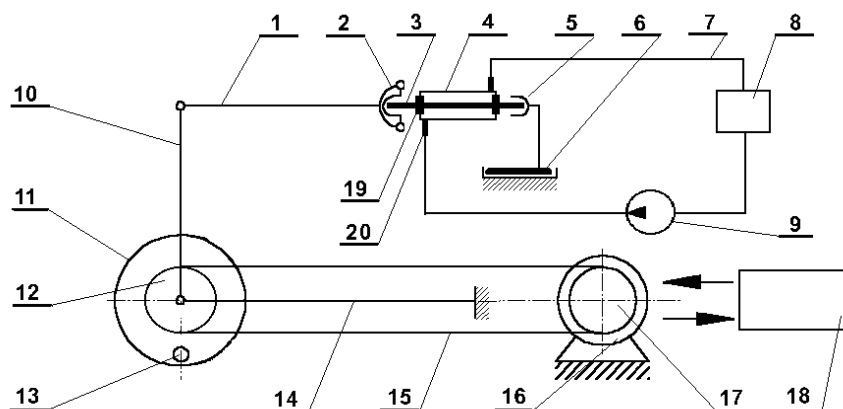
W artykule zaprezentowano prototyp maszyny zmęczeniowej do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję, zwłaszcza materiałów przeznaczonych na elementy konstrukcji morskich, w tym elementy jednostek pływających. Maszyna ta jest przykładem wykonania urządzenia, na które uzyskano patent [12].

Istota urządzenia do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję polega na tym, że cylinder jako naczynie przepływowe ma dwa króćce i dwie elastyczne uszczelki, a przewody łączące naczynie przepływowe ze zbiornikiem cieczy korodującej i z obiegową pompą wymuszającą przepływ cieczy są elastyczne. Badana próbka poddawana jest procesowi zmęczenia za pomocą wibratora harmonicznego, który na obrzeżach tarczy ma nagwintowane otwory do mocowania w nich obciążników.

Urządzenie umożliwia prowadzenie badań przy naprężeniach zginających lub skręcających oraz ich kombinacjach, gdyż cylinder, w którym umieszczona jest próbka, ma dwa króćce i dwie elastyczne uszczelki. Nadto cylinder może być przystosowany do prowadzenia badań w jedno- lub wieloosiowych stanach naprężenia w innych układach wyznaczania trwałości próbki. Elastyczne przewody łączące cylinder ze zbiornikiem cieczy korodującej i z obiegową pompą wymuszającą przepływ cieczy oraz elastyczne uszczelki naczynia przepływowego sprawiają, że próbka

poddawana jest wyłącznie zadanim obciążeniom, ponieważ usztywnienie próbki **3** pochodzące od elementów elastycznych jest pomijalnie małe i nie wpływa na wynik prób zmęczeniowych. Obciążanie badanej próbki za pomocą wibratora harmonicznego powoduje zmęczenie materiału, z którego próbka jest wykonana. Sposób mocowania obciążników na tarczy wibratora ułatwia przygotowanie stanowiska badawczego.

Budowę maszyny objaśniono w oparciu o rysunek 2. przedstawiający schemat urządzenia do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję.



Rys. 2. Schemat maszyny do badania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję

Źródło: opracowanie własne.

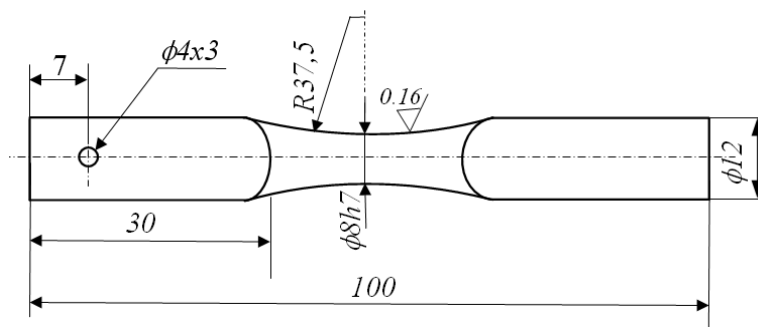
Część robocza badanej próbki **3** materiału konstrukcyjnego szczególnie narażonego na korozję w czasie eksploatacji umieszczona jest w naczyniu przepływowym **4** w kształcie cylindra z dwoma króćcami **20** i dwiema elastycznymi uszczelkami **19**. Naczynie przepływowe **4** połączone jest szeregowo ze zbiornikiem **8** korodującej cieczy o stałym składzie chemicznym i z obiegową pompą **9** wymuszającą przepływ cieczy. W zbiorniku **8** znajduje się ciecz powodująca korozję, a będąca wodą morską lub jej podobną w swym składzie. Przewody **7** łączące naczynie przepływowe **4** ze zbiornikiem **8** cieczy korodującej i z obiegową pompą wymuszającą **9** przepływ cieczy są elastyczne. Badana próbka poddawana jest procesowi zmęczenia za pomocą wibratora harmonicznego, który na obrzeżach tarczy **11** ma nagwintowane otwory do mocowania w nich obciążników **13**. Końce badanej próbki **3** umieszczone są sztywno w uchwyтах: pierwszym **2** i drugim **5**. Uchwyt pierwszy **2** połączony jest przegubowo z dźwignią **1**, która wyposażona jest w czujniki tensometryczne połączone

z komputerem. Dźwignia **1** połączona jest z wibratorem harmonicznym za pomocą cięgna **10**, które stanowi tarcza **11** i koło zębate **12** osadzone na łożyskach tocznych. Na obrzeżach tarczy **11** wibratora harmonicznego usytuowane są nagwintowane otwory, w których mocowane są obciążniki **13** o masie i liczbie stosownej do zadanej wartości amplitudy drgań. Wibrator harmoniczny osadzony jest na korpusie urządzenia za pomocą czterech płaskich sprężyn **14**. Koło zębate **12** wibratora połączone jest za pomocą pasa zębatego **15** z kołem zębatym **17** osadzonym bezpośrednio na wałku silnika elektrycznego **16**, którego prędkość obrotowa regulowana jest za pomocą falownika **18**. Uchwyt drugi **5** połączony jest sztywno z wyskalowaną pokrętną tarczą **6** umocowaną do korpusu urządzenia. Wyskalowaną tarczą **6** ustawiany jest rodzaj stanu naprężenia w badanej próbce **3**, przy czym kąt skręcenia tarczy równy 0° odpowiada zginaniu, a kąt skręcania tarczy równy 90° odpowiada skręcaniu, a każda pośrednia wartość kąta odpowiada złożonemu stanowi naprężenia spowodowanemu równocześnie działającym momentom: zginającemu i skręcającemu. Po zadaniu warunków obciążenia badaną próbkę **3** poddaje się zmęczeniu z chwilą uruchomienia silnika **16** i pompy obiegowej **9**. Próba zmęczeniowa kończy się pęknięciem badanej próbki **3**. Wartości trwałości badanej próbki **3** wyrażone czasem trwania próby i liczbą cykli obciążeń zmęczeniowych są rejestrowane. Wartości trwałości próbek badanego gatunku materiału konstrukcyjnego szczególnie narażonego na korozję uzyskane w wyniku wielokrotnie powtarzanych prób stanowią podstawę do obliczeń wartości wytrzymałości zmęczeniowej tego materiału.

Takie rozwiązanie konstrukcyjne maszyny zmęczeniowej do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję pozwala na montaż dodatkowego oprzyrządowania umożliwiającego realizację cyklicznie zmiennych przebiegów naprężeń z udziałem ich wartości średniej. Możliwe jest więc prowadzenie testów zmęczeniowych obejmujących sinusoidalnie zmienne zginanie i skręcanie z udziałem wartości średniej obciążenia z ustaloną wartością współczynnika asymetrii cyklu.

Kształt i wymiary próbek do przeprowadzenia badań zmęczeniowych i zmęczeniowo-korozyjnych przedstawiono na rysunku 3.

Zakłada się różne warianty wymiarów próbki. Średnica jej środkowej części może przyjmować wymiary od 6 do 8 mm. Pozostałe wymiary próbki pozostają każdorazowo takie same. Wynika to z zastosowanych elastycznych uszczelnień cylindra oraz geometrii uchwytów.

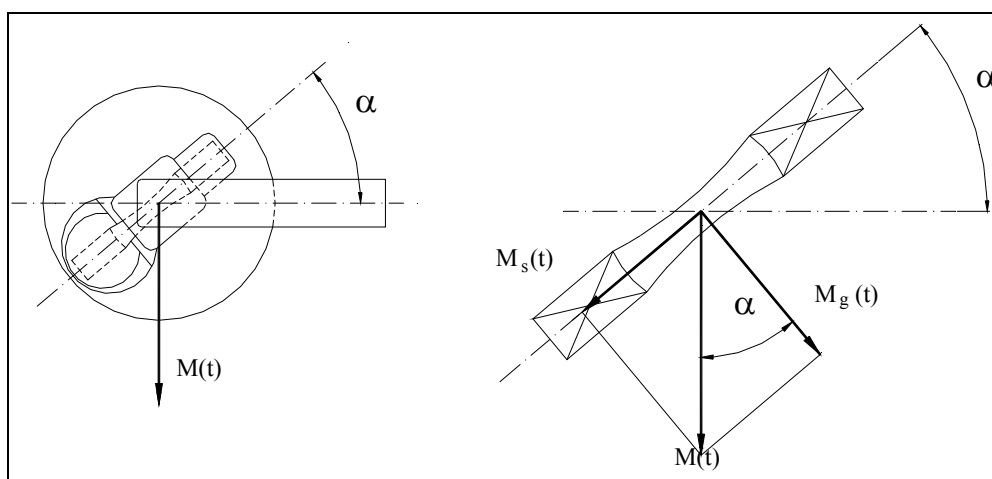


Rys. 3. Kształt i wymiary próbek do badań zmęczeniowych

Źródło: opracowanie własne.

WYZNACZANIE OBCIĄŻEŃ I NAPRĘŻEŃ W PRÓBCE

W trakcie badania próbkę badanego materiału obciąża się sinusoidalnie zmiennym momentem $M(t)$ przenoszonym za pomocą dźwigni 1. Na rysunku 4. przedstawiono schemat obciążenia próbki momentem $M(t)$ oraz jego rozkład na składowe: moment gnący $M_g(t)$ i moment skręcający $M_s(t)$.



Rys. 4. Schemat obciążenia próbki

Źródło: opracowanie własne.

Z rysunku wynika, że:

$$M(t) = \sqrt{M_g^2(t) + M_s^2(t)}, \quad M_g(t) = M(t) \cos \alpha, \quad M_s(t) = M(t) \sin \alpha. \quad (1)$$

Dla przekroju konkretnej próbki oblicza się wskaźnik wytrzymałości przy zginaniu W oraz wyznacza się naprężenie σ w próbce, stosownie do rodzaju stanu naprężenia ustawianego kątem obrotu α wyskalowanej tarczy **6**.

Dla próbki obciążonej wyłącznie momentem gnącym:

$$\alpha = 0^\circ, \quad M(t) = M_g(t), \quad \sigma = \frac{M_g(t)}{W_x}. \quad (2)$$

Dla próbki obciążonej wyłącznie momentem skręcającym:

$$\alpha = 90^\circ, \quad M(t) = M_s(t), \quad \tau = \frac{M_s(t)}{2W_x}. \quad (3)$$

W przypadku zginania ze skręcaniem zgodnie z hipotezą Hubera-Misesa-Hencky'ego:

$$M_z(t) = \sqrt{M_g^2(t) + 0,75M_s^2(t)}, \quad \sigma = \frac{M_z(t)}{W_x}; \quad (4)$$

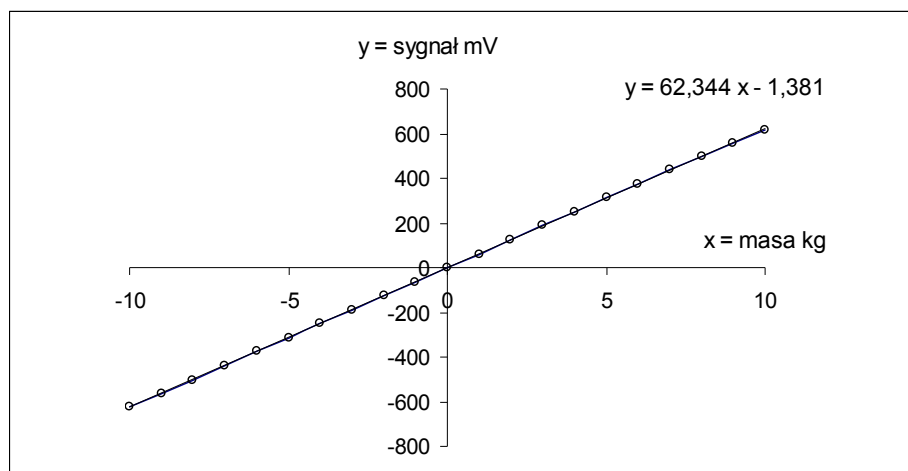
$$\alpha = 30^\circ, \quad M_z(t) = \frac{\sqrt{15}}{4} M(t); \quad (5)$$

$$\alpha = 45^\circ, \quad M_z(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{7}}{2} M(t); \quad (6)$$

$$\alpha = 60^\circ, \quad M_z(t) = \frac{\sqrt{13}}{4} M(t). \quad (7)$$

CECHOWANIE PROTOTYPU MASZYNY ZMĘCZENIOWEJ

W celu wycechowania prototypu maszyny zmęczeniowej rozłączono przegubowe połączenie dźwigni **1** z ciągnem **10**. Następnie na dźwigni w osi przegubu podwieszano obciążniki o różnych masach. Dokonywano każdorazowo rejestracji sygnału z tensometrów umieszczonych na dźwigni. Wykres cechowania pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres cechowania maszyny zmęczeniowej

Źródło: opracowanie własne.

Wyznaczono zależność pomiędzy sygnałem z tensometrów w [mV] a masą zawieszanych obciążników w [kg]. Przekształcając tę zależność, otrzymuje się $x = (y + 1.381) / 62.344$.

Znając masę obciążników, można obliczyć wartości momentu siły obciążającego próbkę, ponieważ odległość między środkową częścią próbki a osią przegubu dźwigni jest stała i wynosi 0,22 [m]. Uwzględniając wartość przyspieszenia ziemskiego, otrzymuje się zależność momentu siły M wyrażonego w [Nm] od sygnału z tensometrów y rejestrowanego w [mV] :

$$M = \left(\frac{y + 1,381}{62,344} \right) \cdot 9.81 \cdot 0.22 .$$

Zależność ta pozwala na wyznaczenie naprężeń w próbce o danej średnicy stosownie do zależności od (2) do (7). Zmieniając prędkość obrotową wibratora harmonicznego za pośrednictwem falownika **18** sterującego pracą silnika elektrycznego **16** oraz dobierając niewyrównoważoną masę obciążnika **13** tarczy **11** można zadać żadaną wartość amplitudy naprężeń w badanej próbce.

W tabeli 1. podano przykładowe wielkości nastawy maszyny zmęczeniowej w zależności od rodzaju obciążenia dla próbki o średnicy 6 mm.

Tabela 1. Nastawy maszyny zmęczeniowej dla złożonego stanu obciążenia

Sygnal [mV]	Moment zastępczy $M_z(t)$ [Nm]	Naprężenie, MPa	Kąt skręcenia tarczy α°	Rodzaj obciążenia próbki
109	3,821	180	0	zginanie
117	3,833	181	45	zgin.-skręc.
121	3,818	180	60	zgin.-skręc.
219	7,629	180	90	skręcanie

Źródło: opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Oczekuje się, że nowa maszyna zmęczeniowa przyczyni się do lepszego poznania właściwości materiałów konstrukcyjnych stosowanych w warunkach obciążeń dynamicznych z równoczesnym oddziaływaniem środowiska aktywnego chemicznie.

Wyniki nowych badań, uzyskane na tym unikatowym stanowisku, mogą w szczególności podnieść bezpieczeństwo i niezawodność elementów konstrukcji morskich, w tym elementów jednostek pływających.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ballard P., Dang Van K., Deperrois A., Papadopoulos Y. V., *High cycle fatigue and a finite element analysis*, 'Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures', 1995, Vol. 18, pp. 397–411.
- [2] Banvillet A., Palin-Luc T., Lasserre S., *A volumetric energy based high cycle multiaxial fatigue criterion*, 'Int. Journal of Fatigue', 2003, Vol. 25, pp. 755–769.
- [3] Brown M. W., Miller K. J., *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, MEP, London 1989.
- [4] Carpinteri A., Spagnoli A., *Multiaxial high-cycle fatigue criterion for hard metals*, 'Int. Journal of Fatigue', 2001, Vol. 23, pp. 135–145.
- [5] Carpinteri A., Spagnoli A., Vantandori S., *A multiaxial fatigue criterion for random loading*, 'Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures', 2003, Vol. 26, pp. 515–522.
- [6] Constantinescu A., Dang Van K., *A Global Computational Approach in Engineering Problems Identification and Fatigue*, Lecture Notes 10, IPPT PAN and CoE AMAS, Warsaw 2004.

- [7] Constantinescu A., Dang Van K., Maitournam M. H., *A unified approach for high and low cycle fatigue based on shakedown concept*, 'Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures', 2003, Vol. 26, pp. 561–568.
- [8] Dang Van K., *Unified fatigue modelling for structural applications based on a multiscale approach and shakedown hypothesis*, Workshop: Optimal Design, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique Palaiseau, France, 2003.
- [9] Dowling N. E., *Mechanical Behaviour of Materials*, Prentice-Hall Int. Editors Inc., Engelwood Cliffs, 1993.
- [10] Ekberg A., Lecture Notes: Multiaxial high cycle fatigue, <http://www.am.chalmers.se/%7Eanek/teaching/fatfract/>.
- [11] Jaworski A., *Podstawy mechaniki ciała stałego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [12] Kyzioł L., Garbacz G., *Urządzenie do wyznaczania trwałości materiałów konstrukcyjnych szczególnie narażonych na korozję*, Akademia Marynarki Wojennej, patent nr 210017, 24.11.2011.
- [13] Niezgodziński M. E., Niezgodziński T., *Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn*, PWN, Warszawa 1973.
- [14] Sines G., *Behaviour of metals under complex static and alternating stresses*, [in:] *Metal Fatigue*, McGraw Hill, New York 1959.

STAND TO TEST FATIGUE STRENGTH OF CONSTRUCTION MATERIALS WITH REGARD TO COMPLEX STRESS STATES EXPOSED TO CORROSION-PRODUCING LIQUID

ABSTRACT

The paper presents an account and principle of operation of a test stand used to determine stability of construction materials exposed to corrosion. The investigations were carried out on samples in the ambient atmosphere and in corrosion environment. Materials used mainly in elements of maritime structures were employed, including elements of floating platforms. The machine for fatigue investigations is an example of a device which was patented.

Keywords:

fatigue investigations, machine for fatigue investigations, bending with torsion.